



**Escuela de Caminos**

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos  
UPC BARCELONATECH

## Efecto del cambio climático sobre procesos de pérdida de suelo en zona montañosa

Trabajo realizado por:

**Stephania Rodríguez**

Dirigido por:

**Carolina Puig Polo**

**Jean Vaunat**

Máster en:

**Ingeniería del Terreno**

Barcelona, junio de 2019

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental

**TRABAJO FINAL DE MÁSTER**

## Resumen

El estudio se enfoca en el análisis de las condiciones de formación de deslizamientos al analizar modelos termo-hidráulicos de respuesta a las acciones climáticas sobre una columna de suelo unidimensional. Los valores desencadenantes se estudian al incorporar modelos predictivos de cambio climático regionales para periodos desde 1961 – 2100. Para el cual se considera el modelo global SMHI-ECHAM5-r3/RCA3(A1B) como la proyección de cambio climático más adecuada para el tratamiento de la zona de estudio de la estación Senet (0.75 E; 42.5 N).

Bajo los reportes actuales al considerar los modelos predictivos de cambio climático, especialmente de la zona mediterránea, se estiman un aumento de temperatura de hasta 4.8°C para las mayores proyecciones de emisiones de gases invernadero. Mientras que las precipitaciones en la temporada de invierno disminuyen. Ambos parámetros siendo desencadenantes importantes en los deslizamientos al provocar vías de infiltración que en eventos de lluvia extrema crean un aumento acelerado de las presiones de agua en el terreno.

La aplicación de un modelo de talud infinito para el análisis de factores de seguridad nos permite efectuar un análisis de estabilidad al evaluar las respuestas del modelo numérico desarrollado en Code Bright. Este se obtiene al calibrar las ecuaciones constitutivas del medio, las condiciones iniciales y los parámetros del material.

El modelo ilustra un problema de flujo y balance de agua, aire y energía de reacción a los escenarios atmosféricos determinantes de estabilidad para diferentes tipologías de suelos y las propiedades térmicas e hidráulicas que influyen en el desarrollo del deslizamiento.

El análisis de la evolución de los factores de seguridad relacionados a las variables atmosféricas (precipitación, temperatura, radiación, humedad relativa, presión atmosférica, velocidad del viento) describen los componentes de la rotura y la sensibilidad de los parámetros constitutivos del suelo. Otros factores como las resistencias heterogéneas dentro del modelo acoplado permiten describir un estado más característico de las laderas naturales y su influencia en los estudios de estabilidad.

Los resultados finales se dirigen a establecer un valor promedio del factor de seguridad, su varianza y la probabilidad de rotura, para estos condicionantes y aplicarlos a los ejercicios de gestión de riesgo.

## **Abstract**

The project focuses on the analysis of landslide formation conditions through thermo-hydraulic models of response to climatic actions on a one-dimensional soil column. The atmospheric values are incorporated via regional climate change predictive models for two periods: 1961 – 2000 and 2011-2100. For the model SMHI-ECHAM5-r3 / RCA3 (A1B) as a result of a correlation analysis is considered as the most appropriate climate change projection for the treatment of the station Senet (0.75 E; 42.5 N).

Current reports when considering the predictive models of climate change, especially in the Mediterranean area, the rise in temperature is up to 4.8 ° C for the largest projections of greenhouse gas emissions. While the rainfall in the winter season decreases. Both parameters are important triggers in landslides by causing infiltration routes that in extreme rain events create an accelerated increase in water pressures in the soil.

The application of an infinite slope model for the analysis of safety factors allows us to perform a stability analysis when evaluating the responses of the numerical model developed in Code Bright. This is obtained by calibrating the constitutive equations of the medium, the initial conditions and the parameters of the material.

The model illustrates a problem of flow and balance of water, air and energy of reaction to the atmospheric determinant stability scenarios for different soil types and the thermal and hydraulic properties that influence the development of the landslide.

The analysis of the evolution of the safety factors related to the atmospheric variables (precipitation, temperature, radiation, relative humidity, atmospheric pressure, wind speed) describe the components of the breakage and the sensitivity of the constitutive parameters of the soil. Other factors such as heterogeneous resistances within the coupled model allow us to describe a more characteristic state of natural slopes and their influence on stability studies.

The objective of the results is aimed at establishing an average value of the safety factor, its variance and the probability of breakage, for these conditioning factors and application to risk management exercises.

## **Agradecimientos**

Este trabajo de investigación es la culminación de esfuerzo y dedicación en la búsqueda de la especialización en las ciencias de los suelos en el vasto espectro de la ingeniería civil. El cual empezó con el ideal de entender y aplicar las leyes y normativas al perfil de nuestro entorno, que continua con estos años de estudio y preparación a nivel de máster y que sean un escalón hacia nuevos horizontes.

Por todo esto y más queremos dedicar este estudio a Dios, padres y profesores, quienes siempre con su apoyo y sabiduría nos guían a través de esta jornada que decidimos emprender en pro de nuestra educación.

Especialmente a todo el equipo de investigadores, profesores y compañeros que componen el grupo de investigación SMuCPhy; que a través de todo su apoyo y compromiso con esta línea de investigación hicieron posible concluir satisfactoriamente este último paso.

## Índice

Resumen .....	i
Abstract.....	ii
Agradecimientos .....	iii
Lista de Figuras .....	vi
Lista de Tablas.....	ix
Simbología.....	x
1    Introducción.....	1
1.1    Definición del Problema y Justificación .....	2
1.2    Aplicaciones inmediatas y limitaciones.....	2
1.3    Objetivos .....	2
1.3.1    General.....	2
1.3.2    Específicos.....	2
2    Antecedentes.....	3
2.1    Aspectos Generales .....	3
2.2    Factores desencadenantes .....	7
2.3    Deslizamientos Superficiales .....	8
2.4    Proyecciones de cambio climático.....	9
2.5    Modelos climáticos globales.....	10
2.6    Modelo Regional.....	11
2.7    Escenario de emisiones .....	12
2.8    Contexto climático regional.....	13
3    Metodología.....	15
3.1    Plan de Trabajo General .....	15
3.2    Modelos de Cambio Climático .....	15
3.3    Índices de cambio climático.....	17
3.4    Correlación a datos observacionales .....	21
3.4.1    Gestión de los datos .....	23
3.5    Modelización Termo-hidráulica en Code Bright .....	23
3.5.1    Columna de suelo bajo acciones climáticas .....	24
3.5.2    Geometría y datos generales.....	26
3.6    Condiciones de contorno y datos de entrada .....	32
3.6.1    Datos atmosféricos .....	35
3.7    Preprocesamiento .....	36

3.8	Factor de Seguridad .....	37
4	Resultados.....	40
4.1	Correlación Spain02 – Modelo SMHI .....	40
4.2	Proyección de cambio climático – Modelo SMHI.....	42
4.2.1	Temperatura máxima.....	42
4.2.2	Temperatura mínima.....	43
4.2.3	WSDI - Duración de las olas de calor .....	44
4.2.4	CSDI - Duración de fríos extremos .....	45
4.2.5	SDII - Intensidad de precipitación anual .....	46
4.2.6	Rx5day - Precipitación consecutiva de 5 días .....	47
4.2.7	RR > 20 mm - Eventos extremos de lluvia por encima de 20 mm.....	48
4.2.8	Precipitación anual .....	49
4.3	Modelos termo-hidráulicos .....	50
4.3.1	Arcilla .....	52
4.3.2	Limo .....	54
4.3.3	Arena .....	59
4.3.4	Temperatura.....	63
4.4	Análisis de Estabilidad (FS) .....	64
4.4.1	Contexto climático.....	67
5	Conclusiones.....	70
5.1	Futuras líneas de investigación .....	72
	Referencias .....	73
	Anexo 1. Índices de Cambio Climático.....	76
	Anexo 2. Evolución de presiones líquidas para diferentes modelos .....	105

## Lista de Figuras

Figura 1. Esquema de análisis por talud infinito (Rahardjo et al., 2008) .....	5
Figura 2. Perfil del factor de seguridad – resistencia homogénea. (Alonso et al., 2003) .....	5
Figura 3. Perfil del factor de seguridad – resistencia heterogénea. (Alonso et al., 2003) .....	5
Figura 4. Esquema de un talud infinito vegetado. (Liu et al., 2016) .....	6
Figura 5. Esquema de las arquitecturas de las raíces. (Liu et al., 2016).....	6
Figura 6. Vista esquemática de las interacciones suelo-vegetación-atmosfera. (Tang et al., 2018) .....	7
Figura 7. Tipos de Deslizamientos. (Corominas & García Yagüe, 1997).....	8
Figura 8. Promedio global de cambio de temperaturas para escenarios emisión de rangos bajos a altos. (EEA, 2017a).....	9
Figura 9. Esquema de Modelos de Circulación Generales (Viner, 2018) .....	10
Figura 10. Esquema de los componentes climáticos globales relevantes a los sistemas de cambio climático (Houghton et al., 1997) .....	11
Figura 11. Esquema de los parámetros del terreno y atmosféricos para el modelo RCA3. (Samuelsson et al., 2011) .....	12
Figura 12. Esquema de los escenarios de emisiones de gases para el SRES. (Nakicenovic et al., 2000).....	13
Figura 13. Cambios proyectados en temperatura y precipitación para Europa.(EEA, 2017b).....	13
Figura 14. Puntos de referencia de la zona de estudio en Cataluña.....	16
Figura 15. Interfaz RClimDex .....	20
Figura 16. Procedimiento de promedio por área de precipitaciones (Chow et al., 1988) .....	21
Figura 17. Estaciones con acceso a datos de precipitación y temperatura (Van Der Schrier et al., 2013).....	21
Figura 18. Matriz de datos Spain02 para la zona de estudio .....	22
Figura 19. Visualización de la matriz Spain02 en una aplicación multiplataforma de visualización netCDF (Panoply).....	23
Figura 20. Columna unidimensional para el modelo termo-hidráulico.....	26
Figura 21. Ecuaciones por resolver para el modelo termo-hidráulico.....	27
Figura 22. Parámetros de la estrategia de solución. ....	28
Figura 23. Curvas de Retención para los suelos tipo a estudiar .....	29
Figura 24. Esquema del formato del archivo de data atmosférica. (Departament d'Enginyeria del Terreny, 2017) .....	36
Figura 25. Esquema de los intervalos de tiempo. ....	36

Figura 26. Esquema de la malla de la columna unidimensional. ....	37
Figura 27. Esquema de análisis por talud infinito. ....	38
Figura 28. Índices PRCPTOT para Spain02 y SMHI.....	40
Figura 29. Índices TMin para Spain02 y SMHI.....	41
Figura 30. Índice TMax para Spain02 y SMHI.....	41
Figura 31. Tendencias de temperatura máxima 1961-2000 .....	42
Figura 32. Tendencias de temperatura máxima 2011-2100 .....	43
Figura 33. Tendencias de temperatura mínima 1961-2000 .....	43
Figura 34. Tendencias de temperatura mínima 2011-2100 .....	44
Figura 35. Índice WSDI (Duración de las olas de calor).....	45
Figura 36. Índice CSDI (Duración de fríos extremos) .....	46
Figura 37. Índice SDII (Intensidad de precipitación anual) .....	46
Figura 38. Índice Rx5 (precipitación consecutiva de 5 días) 1961-2000 .....	47
Figura 39. Índice Rx5 (precipitación consecutiva de 5 días) 2011-2100 .....	48
Figura 40. Índice RR > 20mm (eventos extremos de lluvia por encima de 20 mm).....	48
Figura 41. Índice PRCPTOT (precipitación total anual, mm).....	49
Figura 42. Histograma de precipitaciones anuales 2011-2100.....	50
Figura 43. Gráfica de control individual de rango móvil de precipitaciones 2011-2100 .....	50
Figura 44. Evolución de las presiones líquidas en la zona no saturada para diferentes niveles freáticos .....	51
Figura 45. Evolución de las presiones líquidas por debajo del nivel freático .....	51
Figura 46. Succión a diferentes profundidades de la columna de arcilla (1961-2000) ..	52
Figura 47. Succión a diferentes profundidades de la columna de arcilla (2011-2100) ..	53
Figura 48. Grado de saturación a diferentes profundidades de la columna de arcilla (1961-2000) .....	53
Figura 49. Grado de saturación a diferentes profundidades de la columna de arcilla (2011-2100) .....	54
Figura 50. Modelo bicapa para una columna de 50 metros.....	55
Figura 51. Succión a diferentes profundidades de la columna de limo (1961-2000).....	55
Figura 52. Grado de saturación a diferentes profundidades de la columna de limo (1961-2000) .....	56
Figura 53. Succión a diferentes profundidades de la columna de limo (2011-2100).....	56
Figura 54. Grado de saturación a diferentes profundidades de la columna de limo (2011-2100) .....	57
Figura 55. Succión a diferentes profundidades de la columna de limo (1961-2000).....	58



Figura 56. Succión a diferentes profundidades de la columna de limo (2011-2100)....	58
Figura 57. Grado de saturación a diferentes profundidades de la columna de limo (1961-2000) .....	59
Figura 58. Grado de saturación a diferentes profundidades de la columna de limo (2011-2100) .....	59
Figura 59. Succión a diferentes profundidades de la columna de arena (1961-2000)....	60
Figura 60. Succión a diferentes profundidades de la columna de arena (2011-2100)....	60
Figura 61. Grado de saturación a diferentes profundidades de la columna de arena (1961-2000) .....	61
Figura 62. Succión a diferentes profundidades de la columna de arena (1961-2000)....	61
Figura 63. Succión a diferentes profundidades de la columna de arena (2011-2100)....	62
Figura 64. Grado de saturación a diferentes profundidades de la columna de arena (1961-2000) .....	62
Figura 65. Evolución de la temperatura en la columna de arcilla (1961-2000) .....	63
Figura 66. Evolución de la temperatura en la columna de arcilla (2011-2100) .....	63
Figura 67. Número de eventos de rotura anuales para el análisis de la arcilla .....	64
Figura 68. Evolución del Factor de Seguridad – Limo.....	65
Figura 69. Número de eventos de rotura anuales para el análisis del limo .....	65
Figura 70. Evolución del factor de seguridad – resistencia heterogénea (Arena – Arcilla).....	66
Figura 71. Número de eventos de rotura anuales para el análisis de la arena .....	66
Figura 72. Evolución de la precipitación diaria.....	67

## Lista de Tablas

Tabla 1. Variables del proyecto de regionalización dinámica.....	16
Tabla 2. Índices de Cambio Climático .....	18
Tabla 3. Parámetros de la Curva de Retención Van Genuchten para los suelos de estudio .....	29
Tabla 4. Parámetros de Permeabilidad Intrínseca .....	30
Tabla 5. Parámetros de Permeabilidad Relativa para la fase líquida .....	31
Tabla 6. Parámetros de Flujo conductor de calor .....	32
Tabla 7. Valores de porosidad inicial .....	33
Tabla 8. Parámetros atmosféricos de la zona de estudio .....	34
Tabla 9. Datos atmosféricos variables en el tiempo. ....	35
Tabla 10. Parámetros mecánicos e hidráulicos de análisis del factor de seguridad .....	39
Tabla 11. Correlación NMSE de los índices Spain02 y SMHI .....	40
Tabla 12. Índices de temperatura para eventos críticos (1994) .....	68
Tabla 13. Índices de temperatura para eventos críticos (2054) .....	68
Tabla 14. Índices de precipitación para eventos críticos (1994) .....	68
Tabla 15. Índices de temperatura para eventos críticos (2054) .....	69

## Simbología

	Descripción	Unidades
$P_0$	Presión medida a cierta temperatura	MPa
$\sigma_0$	Tensión superficial a la temperatura a la cual fue medida $P_0$	N/m
$\lambda$	Función de forma	-
$S_{rl}$	Saturación residual	-
$S_{ls}$	Saturación máxima	-
$(k_{11})_0$	Permeabilidad intrínseca 1ra dirección principal	m <sup>2</sup>
$(k_{22})_0$	Permeabilidad intrínseca 2da dirección principal	m <sup>2</sup>
$(k_{33})_0$	Permeabilidad intrínseca 3ra dirección principal	m <sup>2</sup>
$\varphi_0$	Porosidad de referencia	-
$\varphi_{min}$	Porosidad mínima	-
$\lambda$	Potencia	-
$S_{ls}$	Saturación máxima	-
$\lambda$	Potencia	-
A	Constante	-
D	Parámetro constante difusión de vapor	m <sup>2</sup> Pa/K <sup>n</sup> s
n	Parámetro exponencial difusión de vapor	-
$\tau_0$	Tortuosidad	-
$\lambda_d$	Conductividad térmica de un medio poroso seco	W/(m·K)
$\lambda_{sat}$	Conductividad térmica de un medio poroso saturado en agua	W/(m·K)
$\lambda_d$	Conductividad térmica seca para la porosidad de referencia	W/(m·K)
$\lambda_{sat}$	Conductividad térmica saturada para la porosidad de referencia	W/(m·K)
E	Módulo de Young	MPa

$\nu$	Coeficiente Poisson	-
$\varphi_0$	Porosidad de referencia	-
$\varphi_{min}$	Porosidad mínima	-
$\phi'$	Angulo de fricción	-
$c'$	Cohesión	kN/m <sup>2</sup>
$\gamma$	Peso especifico	kN/m <sup>3</sup>
$P_l$	Presión liquida	MPa
$P_g$	Presión de gas	MPa
$T$	Temperatura	°C
$\omega_l^w$	Fracción másica del agua en estado liquido	-
$\omega_g^w$	Fracción másica del agua en estado gaseoso	-
$\rho_l$	Densidad estado líquido	kg/m <sup>3</sup>
$\rho_g$	Densidad estado gaseoso	kg/m <sup>3</sup>
$\rho_s$	Densidad estado solido	kg/m <sup>3</sup>
$S_l$	Saturación estado liquido	-
$S_g$	Saturación estado gaseoso	-
$\phi$	Porosidad	-
$E_l$	Energía estado liquido	J/kg
$E_g$	Energía estado gaseoso	J/kg
$E_s$	Energía estado solido	J/kg
$j_l^w$	Flujo de advección total agua estado liquido	kg/m <sup>2</sup> s
$j_g^w$	Flujo de advección total agua estado gaseoso	kg/m <sup>2</sup> s
$j_{Es}$	Flujo de advección de energía en el medio solido	J/m <sup>2</sup> s
$j_{El}$	Flujo de advección de energía en el medio liquido	J/m <sup>2</sup> s
$j_{Eg}$	Flujo de advección de energía en el medio gaseoso	J/m <sup>2</sup> s
$i_c$	Flujo de energía	J/m <sup>2</sup> s

$f^w$	Fuente externa	$\text{Kg/m}^3\text{s}$
$f^Q$	Fuente de energía	$\text{J/ m}^3\text{s}$
$P_{ga}$	Presión atmosférica	MPa
$\gamma_g$	Coeficiente de filtración	$\text{Kg/m}^3$
$\rho_{va}$	Humedad absoluta de la atmosfera	-
$\rho_v$	Humedad para la condición de contorno	-
$k$	Constante Von Karman	-
$\varphi$	Factor de estabilidad	$\text{Kg/m}^3$
$v_a$	Velocidad del viento	m/s
$z_0$	Longitud de rugosidad	m
$z_a$	Altura de la pantalla en la cual se miden la velocidad del viento y la humedad absoluta	m
$R_g$	Radiación directa de onda corta	$\text{J/m}^2\text{s}$
$R_a$	Radiación atmosférica de onda larga	$\text{J/m}^2\text{s}$
$A_l$	Reflectancia difusa	-
$\varepsilon$	Emisividad	-
$\sigma$	Constante Stefan-Boltzman	-
$C_a$	Calor especifico del gas	J
$h_v$	Energía libre del vapor	J
$h_{la}$	Energía libre del agua líquida	J
$h_{a0}$	Energía libre del aire	J
FD	Número de días de heladas	Días
SU	Número de días de verano	Días
ID	Número de días de congelación	Días
TR	Número de noches tropicales	Días
GSL	Duración de la temporada de crecimiento	Días

TXx	Temperaturas máximas diarias	°C
TNx	Temperaturas mínimas diarias	°C
TXn	Temperatura máxima diaria mínima	°C
TNn	Temperatura mínima diaria mínima	°C
TN10p	Temperatura mínima diaria en el percentil 10	%
TX10p	Temperatura máxima diaria en el percentil 10	%
TN90p	Temperatura mínima diaria en el percentil 90	%
TX90p	Temperatura máxima diaria en el percentil 90	%
WSDI	Índice de duración de olas de calor	Días
CSDI	Índice de la duración de fríos extremos	Días
DTR	Rango de temperatura diaria	°C
Rx1day	Precipitación máxima mensual de 1 día	mm
Rx5day	Precipitación mensual máxima consecutiva de 5 días	mm
SDII	Índice de intensidad de la precipitación simple	mm/día
R10mm	Precipitación diaria $\geq 10$ mm	Días
R20mm	Precipitación diaria $\geq 20$ mm	Días
R25mm	Precipitación diaria $\geq 25$ mm	Días
DDC	Duración máxima de la temporada seca	Días
CWD	Duración máxima de la temporada húmeda	Días
R95pTOT	PRCP total anual cuando RR> 95p	mm
R99pTOT	PRCP total anual cuando RR> 99p	mm
PRCPTOT	Precipitación total anual en días húmedos	mm
RR	Valor de la precipitación diaria	mm

## **1 Introducción**

Uno de los fenómenos geológicos – geotécnicos de mayor impacto y frecuencia en las comunidades son los deslizamientos de laderas. Los elementos condicionantes de la rotura son la suma de todas las interacciones de los parámetros geotécnicos y los componentes atmosféricos. Cada uno modela de una manera particular la reacción del entorno, lo cual nos lleva a establecer un foco más regional al estudio de este problema.

El estudio se enfoca en las proyecciones de cambio climático para la zona de estudio de la Estación Senet (0.75 E; 42.5 N) para periodos desde 1961 – 2100, al considerar el modelo predictivo de cambio climático SMHI-ECHAM5-r3/RCA3(A1B).

La aplicación de un modelo de talud infinito para el análisis de factores de seguridad nos permite efectuar un análisis de estabilidad al evaluar las respuestas del modelo numérico desarrollado en Code Bright. Este se obtiene al calibrar las ecuaciones constitutivas del medio, las condiciones iniciales y los parámetros del material.

Al considerar las conexiones suelo-vegetación-atmósfera debemos considerar la influencia del cambio climático como uno de los componentes actuales de mayor impacto en el tratamiento de análisis de estabilidad de taludes.

En referencia a la vinculación de las proyecciones de cambio climático y la estabilidad de taludes, los factores a considerar manifiestan los siguientes estados: mínimos y máximos de la temperatura promedio anual, fluctuaciones en intensidad y duración disminución de las precipitaciones anuales, la evapotranspiración y la temperatura de suelo. Cambios en estos elementos que conduzcan a una disminución del nivel freático, del flujo en ríos y del contenido de agua en suelos; crea la posibilidad de deslizamientos superficiales de mayor magnitud, para las mismas condiciones geomecánicas y dimensionales.

Al evaluar los modelos de cambio climático tanto globales como regionales, la zona mediterránea europea presenta un incremento de temperatura mayor al promedio europeo y la precipitación anual será menor. En donde los eventos desencadenantes de deslizamientos están concentrados en lluvias extremas en los períodos de verano, las cuales aumentarán en frecuencia e intensidad; y amplificado debido al aumento de la presencia de agrietamiento debido a las elevadas temperaturas y a la disminución del nivel freático en la temporada de invierno.

Bajo los reportes actuales para la zona mediterránea, se estiman un aumento de temperatura de hasta 4.8°C para las mayores proyecciones de emisiones de gases invernadero. Mientras que las precipitaciones en la temporada de invierno disminuyen.

La vinculación de los aspectos atmosféricos a los deslizamientos se establece al desarrollar un modelo hidrológico en respuesta a las precipitaciones y temperatura (evapotranspiración), para una columna unidimensional a pasos de tiempo de un día para 4 periodos de estudio: 1961-2000, 2011-2040, 2041-2070, 2071-2100 basados en modelos predictivos de cambio climático.

El trabajo se enfoca principalmente en el análisis de las condiciones de formación de deslizamientos superficiales resultante de las interacciones precipitación - temperatura, al estudiar modelos predictivos. Con la finalidad de obtener factores de seguridad relacionados a los mecanismos desencadenantes.

Los resultados finales se dirigen a establecer un valor promedio del factor de seguridad, su varianza y la probabilidad de rotura, para estos condicionantes y aplicarlos a los ejercicios de gestión de riesgo.

### ***1.1 Definición del Problema y Justificación***

Al evaluar los modelos de cambio climático tanto globales como regionales, la zona mediterránea europea presenta un incremento de temperatura mayor al promedio europeo y la precipitación anual será menor (Kelemen et al., 2009). En donde los eventos desencadenantes de deslizamientos están concentrados en lluvias extremas en los períodos de verano, las cuales aumentarán en frecuencia e intensidad; y amplificado debido al aumento de la presencia agrietamiento debido a las elevadas temperaturas y a la disminución del nivel freático en la temporada de invierno.

### ***1.2 Aplicaciones inmediatas y limitaciones***

Una de las limitaciones de los resultados en su confiabilidad en base a los modelos globales, regionales y de emisiones a utilizar como referencia para el tratamiento de los datos atmosféricos a emplear para el modelamiento. De allí que se referencian estudios como Turco et al. (2017) que crean comparativos de las diferentes proyecciones y caracterizan los puntos óptimos de su ejecución.

Esto nos permite establecer modelos que reflejen de manera más segura las proyecciones y los valores a obtener en eventos similares, siendo esto un punto fundamental en la evaluación de los factores de seguridad y la gestión de riesgo y control.

### ***1.3 Objetivos***

#### **1.3.1 General**

- Efectuar un análisis de estabilidad de taludes mediante un modelo numérico desarrollado en Code Bright, al considerar los efectos de procesos atmosféricos de modelos climáticos predictivos para la zona de estudio de la Estación Senet.

#### **1.3.2 Específicos**

- Analizar el modelo global, regional y de escenarios climáticos para el área de estudio (Senet) para los periodos de estudio dentro de los parámetros de precipitación y temperatura.
- Desarrollar un modelo hidro-termo-mecánico para el estudio de las interacciones de los eventos atmosféricos y las propiedades geomecánicas del terreno, que permita establecer los eventos desencadenantes de inestabilidad en el talud.
- Calibrar un modelo en Code Bright en el cual se definan las ecuaciones constitutivas del medio, las condiciones iniciales, parámetros del material y los elementos atmosféricos.
- Evaluar los cambios en los patrones del factor de seguridad de unos pocos taludes tipo.



## 2 Antecedentes

### 2.1 Aspectos Generales

Entidades como Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change) y la Agencia Europea del Medio Ambiente (EEA, European Environment Agency) recopilan información y monitorización de los proyectos de evaluación y modelización de los fenómenos de cambio climático y como estos afectan los entornos socioeconómicos y del medio ambiente.

Reportes de cambio climáticos globales de la IPCC describen un aumento de la temperatura de 0.3 – 1.7°C para los escenarios de menor emisión, y 2.6 – 4.8°C para los de mayor emisión.

Al estudiar valores históricos y actuales, los informes de la EEA presentan cambios de temperatura entre 1976 y el 2006 para toda la región europea, donde se detallan aumentos desde 0.2 a 2 °C por década. En la región europea se han presentado aumentos en la intensidad y frecuencia de la precipitación intensa y en el periodo de 2002 – 2011 la temperatura ha sufrido un incremento por encima de los niveles preindustriales por 1.3°C (Tang et al., 2018).

Los modelos climáticos regionales predicen cambios importantes para la zona europea mediterránea, donde la temperatura aumenta y las precipitaciones en la temporada de invierno disminuyen. Estos valores disminuirán el nivel freático lo cual podría interpretarse como un factor hacia la estabilidad, pero al incluirse la desecación del terreno debido a las temperaturas provoca vías de infiltración que en eventos de lluvia extrema en verano crea deslizamientos de mayor impacto, al aumentar de manera acelerada las presiones de agua en el terreno.

La estabilidad de taludes y laderas tienen un fuerte componente geológico – geomorfológico, donde los parámetros mecánicos de resistencia de los materiales y la geometría general del área tienen una influencia importante en los factores de riesgo y los estudios para delimitar medidas de diseño y seguridad.

Los métodos de análisis se centran en determinar el estado último donde la rotura provoca el desprendimiento de grandes masas de suelo a través de la reactivación de fallas o la aceleración de movimientos activos; que podrían afectar secciones aisladas de terreno o impactar vías de transporte o poblaciones.

La apropiada descripción, categorización y la creación de inventarios de los diferentes eventos de deslizamientos permite contar con información importante que indique los factores desencadenantes que llevan a la rotura, la morfología crítica del entorno y la necesidad de intervención en el medio.

Diferentes estudios se han enfocado en analizar la influencia de los elementos desencadenantes de los deslizamientos al estudiar los factores que componen el factor de seguridad. Autores como Buma y Dehn (1998), Collison et al. (2000) y Gariano et al. (2017) han establecido evaluaciones referenciales regionales para el estudio de la influencia de estos cambios climáticos como elemento desencadenante de deslizamientos, al evaluar las tendencias temporales de estabilidad para escenarios de cambio climático, estudios hidrológicos locales y modelos geomorfológicos.

Un primer punto de estudio es el análisis de los ciclos del agua y como este se convierte en un factor desencadenante de roturas en laderas. Crozier (2010) recopila la evidencia teórica de estos eventos a través de medidas estadísticas de los ciclos hidrológicos y los cambios del mecanismo de las laderas.

Dehn et al. (2000) utiliza modelos reológicos y modelos hidrológicos tipo tanque para evaluar los cambios de nivel freático diario, incluyendo modelos de visco plasticidad, como punto de partida a los valores históricos observacionales de correlación.

Alvioli et al. (2018) enfatizan el aspecto influyente de la duración e intensidad de las lluvias como elemento intensificador de las fallas en laderas, a través de una proyección de 40 años y elementos de escala reducida para la región central de Italia. Con la finalidad de obtener las variaciones en los umbrales de respuesta de las zonas de falla.

Un gran número de estas investigaciones se centran en analizar datos históricos y así obtener una correlación de sus efectos en las temáticas de estabilidad. Gariano et al. (2017) estudia 603 estaciones de datos meteorológicos entre 1981-2010 y así obtener las frecuencias de distribución espacial que se comparan con modelos predictivos RCP4.5 y RCP8.5; que ilustran aumentos en las frecuencias e intensidades de las precipitaciones, causando cambios de +45.7% y +21.2% de los eventos de rotura.

Cuando los estudios son más locales, podemos ver la forma puntual de cambio de la respuesta tanto de las predicciones de cambio climático como la influencia en el estado de estabilidad. Collison et al. (2000) realiza estudios para Inglaterra en una zona de 4km, donde la información geográfica e hidrológica estimada muestra un aumento en las precipitaciones que será igual a la evapotranspiración, lo cual mantiene estable el número de eventos de rotura. Pero los cambios en la dinámica de almacenamiento de humedad en el suelo pueden reducir el número de deslizamientos superficiales de menor intensidad.

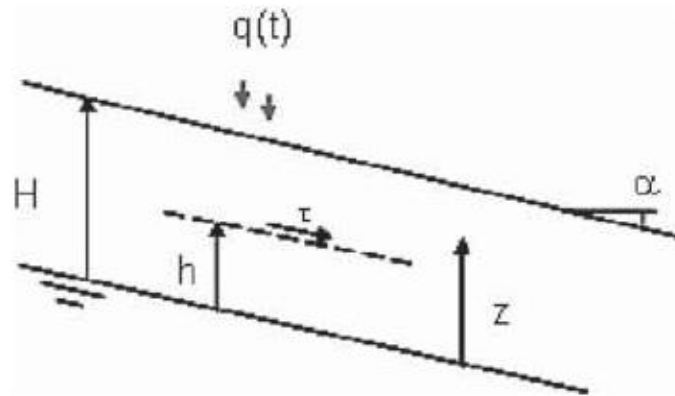
Alonso et al. (2003) realizaron la instrumentación de un talud inestable de arcillas sobreconsolidadas, en el cual se enfocan en los parámetros no saturados siendo las presiones intersticiales y las precipitaciones los elementos condicionantes de los elementos hidrogeológicos.

En análisis de los factores locales de seguridad los ejecutan a través de las ecuaciones de talud infinito como se ilustra en la Figura 1, y su alternativa bajo  $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ :

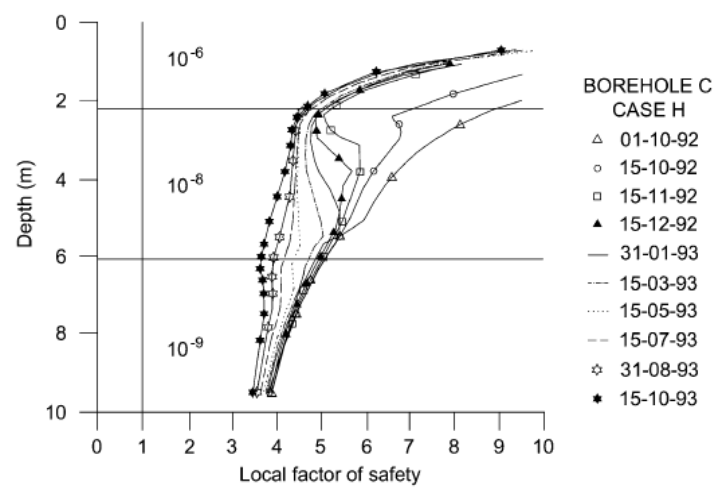
$$F = \frac{c' + (\gamma d \cdot \cos^2 \alpha - p_w) \tan \varphi'}{\gamma d \cdot \sin \alpha \cos \alpha} \quad (1)$$

$$F = \frac{c' + \left[ \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cos 2\alpha - \tau_{xy} \sin 2\alpha - p_w \right] \tan \varphi'}{\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \sin 2\alpha - \tau_{xy} \cos 2\alpha} \quad (2)$$

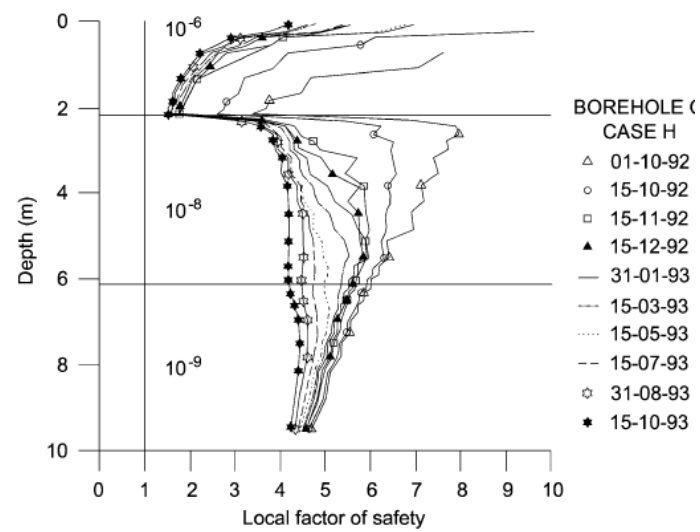
Donde  $d$  es la profundidad,  $\gamma$  peso específico,  $\alpha$  la inclinación del talud y  $p_w$  es una presión del agua como una función del tiempo.



**Figura 1.** Esquema de análisis por talud infinito (Rahardjo et al., 2008)



**Figura 2.** Perfil del factor de seguridad – resistencia homogénea (Alonso et al., 2003)



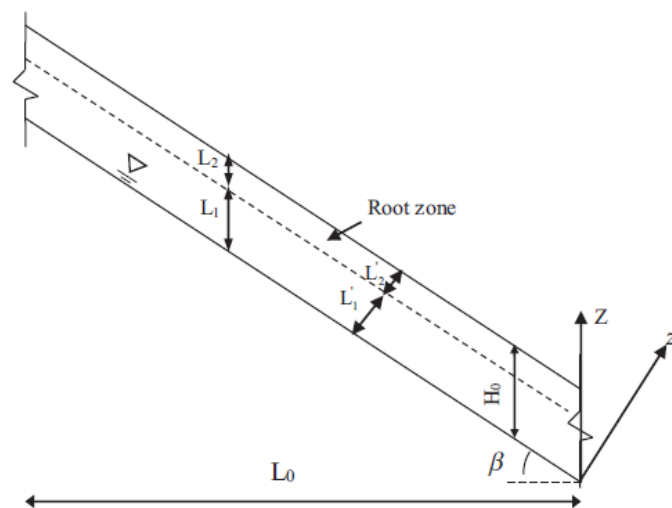
**Figura 3.** Perfil del factor de seguridad – resistencia heterogénea (Alonso et al., 2003)

La evolución de las presiones en la zona de sondeo para diferentes fechas de estudio y un modelo de material de resistencia homogénea resulta en el cálculo de factores de seguridad a lo largo de la profundidad de la sonda (Figura 2). Otros cálculos representan condiciones de resistencia heterogénea para las capas superficiales en estado remodelado (Figura 3).

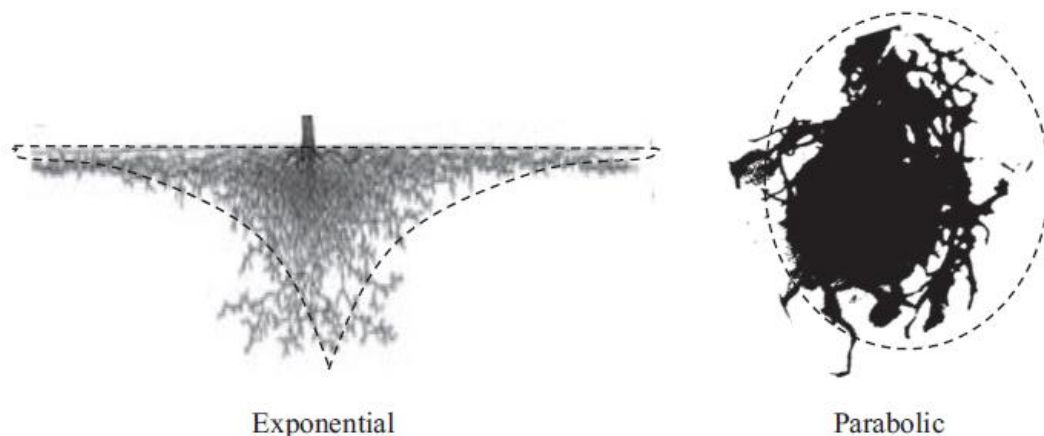
Al considerar los parámetros de resistencia heterogénea para eventos de precipitación extrema para una condición de inundación, donde la intensidad es mayor a la de infiltración en el talud se analizan los perfiles del factor de seguridad.

Otro factor a considerar es el efecto de la vegetación en la estabilidad del talud, el cual está representado en la investigación de Liu et al. (2016). La evaluación del factor de seguridad se modifica para integrar la zona de raíces de la vegetación de arquitecturas exponenciales y parabólicas.

El estudio incluye los parámetros de la zona de raíces (Figura 4), la intensidad de la lluvia, los patrones de lluvia en el análisis de estabilidad y la evolución del factor de seguridad en el perfil del terreno para diferentes intensidades de precipitación, al considerar una forma parabólica (Figura 5) para la estructura de las raíces y se describen los cambios al salir de la zona vegetada.



**Figura 4.** Esquema de un talud infinito vegetado (Liu et al., 2016)



**Figura 5.** Esquema de las arquitecturas de las raíces (Liu et al., 2016)

## 2.2 Factores desencadenantes

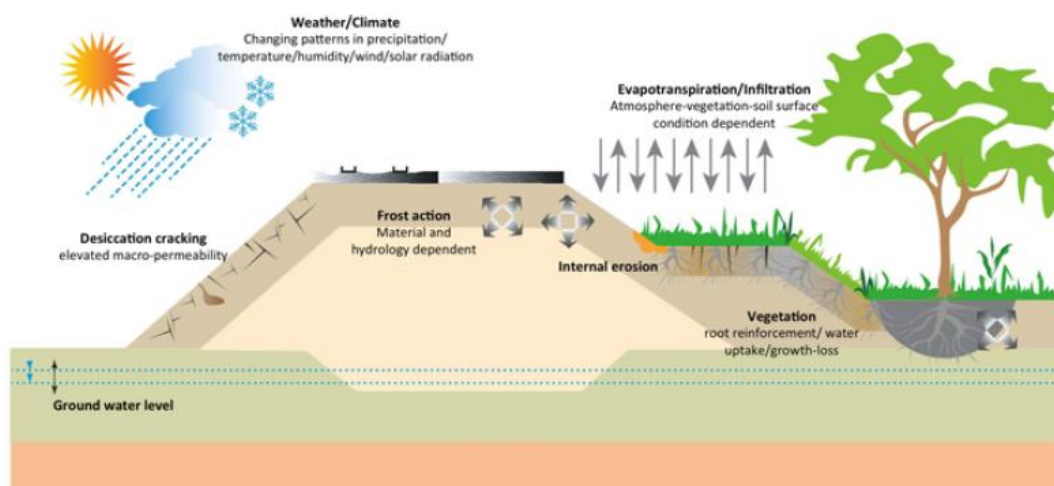
Los condicionantes de estabilidad de taludes puede verse sujetos a diferentes mecanismos, como también pueden ocurrir de forma espontánea. Los desencadenantes críticos para este fenómeno provocan principalmente un aumento rápido de las presiones intersticiales, siendo la intensidad y duración de la precipitación uno de los principales mecanismos desencadenantes de deslizamientos, especialmente en zonas montañosas sujetas a erosión, debido a cambios en el uso que lleven a un menor recubrimiento vegetal.

Existen otros factores externos que pueden intervenir en la rotura como el deshielo, sismos, erupciones, socavación; pero la lluvia es uno de los factores que interviene de manera más frecuente, según Corominas y Moreno (2005) los grandes movimientos registrados en Cataluña en el siglo XX se deben a episodios de lluvia.

Cuando se esquematizan los diferentes fenómenos atmosféricos que se encuentran en interacción con los taludes (Figura 6) podemos listar medios como la desecación, evapotranspiración, infiltración, drenaje, escorrentía, presencia de vegetación y la penetración de raíces; que pueden contribuir a que los efectos de las lluvias se amplifiquen en el medio llevando este a un estado crítico. Estos elementos se verán afectados por los procesos de temperatura, radiación, humedad relativa y presión atmosférica como factores climáticos determinantes del medio.

Esta sensibilidad a factores climáticos ha sido fuente de estudios previos, en Corominas y Moya (1999) se han descritos umbrales críticos de precipitación de 40 a 100 mm en un periodo de 24 horas, siempre que se hayan acumulado 90 mm previos. Esto indica riesgos en períodos estacionales de eventos de lluvia extremos o de intensidad baja, pero en tiempos prolongados.

Otros factores que considerar son las características propias de los materiales que constituyen las laderas, donde la resistencia y permeabilidad pueden condicionar cómo evolucionan las tensiones, la infiltración y el drenaje.



**Figura 6.** Vista esquemática de las interacciones suelo-vegetación-atmósfera (Tang et al., 2018)

Dentro de las interacciones suelo-atmosfera, Corominas y Moya (1999) evidencian las inestabilidades en base a la existencia de precipitaciones antecedentes. Para eventos donde no se registren estados previos, una intensidad alta y de corta duración afecta más rápidamente a terrenos coluviales y de roca fragmentada desencadenando deslizamientos superficiales. En cambio, para formaciones arcillosas con predisposición a eventos de lluvias previos pueden provocar deslizamientos rotacionales o traslacionales para precipitaciones moderadas.

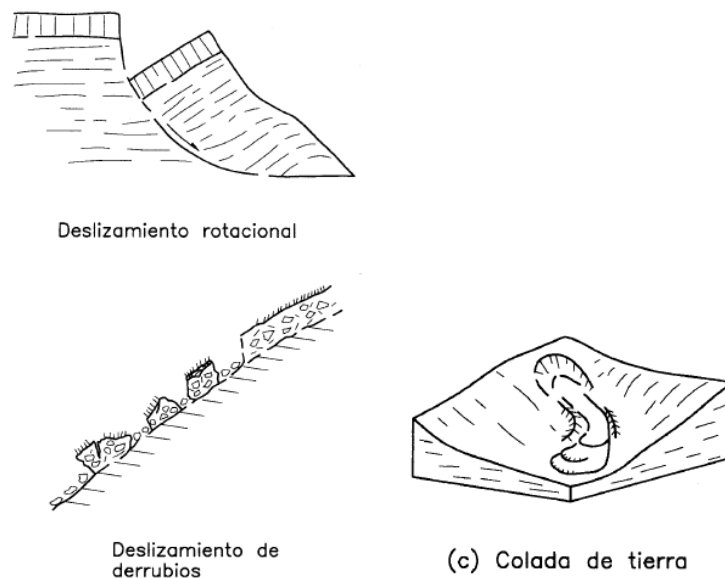
### 2.3 Deslizamientos Superficiales

En medios donde la duración e intensidad de los eventos de lluvia son uno de los factores desencadenantes principales de deslizamientos, las roturas se suelen describir como deslizamientos superficiales y desprendimientos donde los depósitos de coluviones y rocas fracturadas se movilizan ladera abajo en superficie de rotura definidas.

En la Figura 7, el deslizamiento rotacional presenta una superficie de rotura curvilínea y cóncava cuando al acumularse el agua las presiones ocasionan el deslizamiento, y puede evolucionar a una colada de tierra.

Este tipo de deslizamiento suele afectar formaciones poco resistentes, donde los valores geomorfológicos son determinantes de las inestabilidades. A su vez valores externos como el tipo de vegetación y el uso del suelo intervienen como factores externos.

A su vez la geometría del talud incorpora otros valores importantes del estado mecánico del talud que interfieren en las ecuaciones del factor de seguridad de talud infinito, siendo el criterio de ángulo de inclinación el termino determinante, el cual para las condiciones de deslizamientos superficiales y del suelo encuentra sensibilidad de reacción entre  $20^\circ$  y  $50^\circ$ .



**Figura 7.** Tipos de Deslizamientos (Corominas y García Yagüe, 1997)

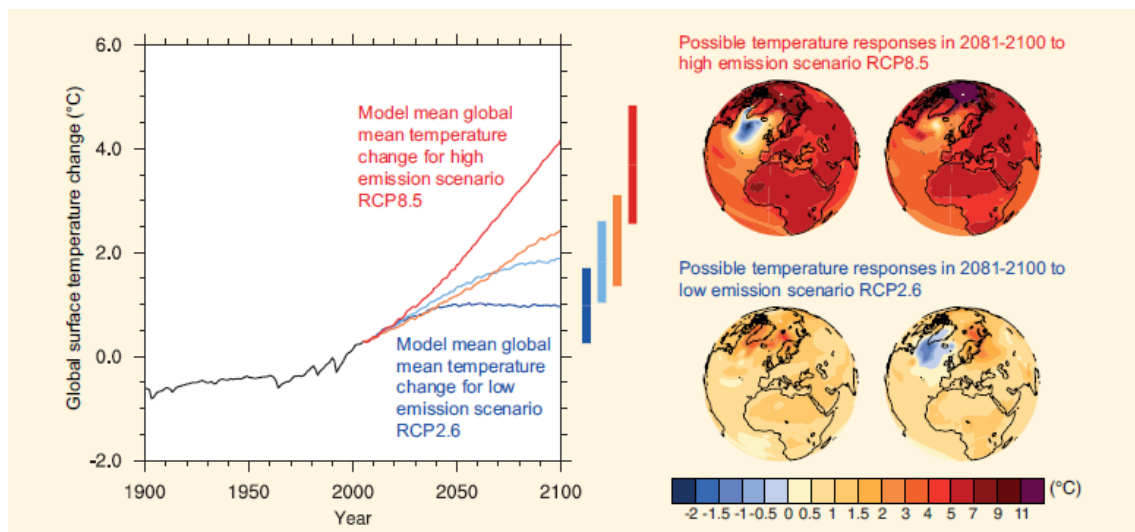
## 2.4 Proyecciones de cambio climático

En el 2006, el Gobierno de España publica el Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (PNACC) con el objetivo de estudiar la evolución e impactos del cambio climático en el territorio español. Por lo cual se asigna a la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) la tarea de general escenarios de cambio climático particulares para España a través de metodologías dinámicas y estadísticas, tomando como referencia los modelos de predicción globales ya establecidos.

Bajo las proyecciones globales IPCC se crea el proyecto denominado ENSEMBLES donde se estudian diferentes modelos globales, regionales y escenarios de emisiones. Donde se obtienen respuestas diarias con una resolución de  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ .

Esta información se consigue al evaluar las proyecciones globales y los escenarios de emisiones de los informes del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, siglas en ingles) y los proyectos de regionalización dinámica del EURO-CORDEX (Experimento de reducción de escala coordinada - Dominio Europeo).

Para que el modelo presentado sea válido bajo las líneas de investigación, el IPCC recomienda una serie de criterios (IPCC, 2019): consistencia con las proyecciones globales, plausibilidad física, aplicabilidad en el estudio de impactos, representatividad, y por último, accesibilidad. Estos parámetros permiten determinar los escenarios que mejor se ajusta al estudio.



**Figura 8.** Promedio global de cambio de temperaturas para escenarios emisión de rangos bajos a altos (EEA, 2017a)

La disponibilidad de los conjuntos de datos se enfoca en promover las evaluaciones de impacto y vulnerabilidad de diferentes sectores, y así impulsar políticas dirigidas a la prevención y promoción de los campos sensibles a las condiciones de cambio climático.

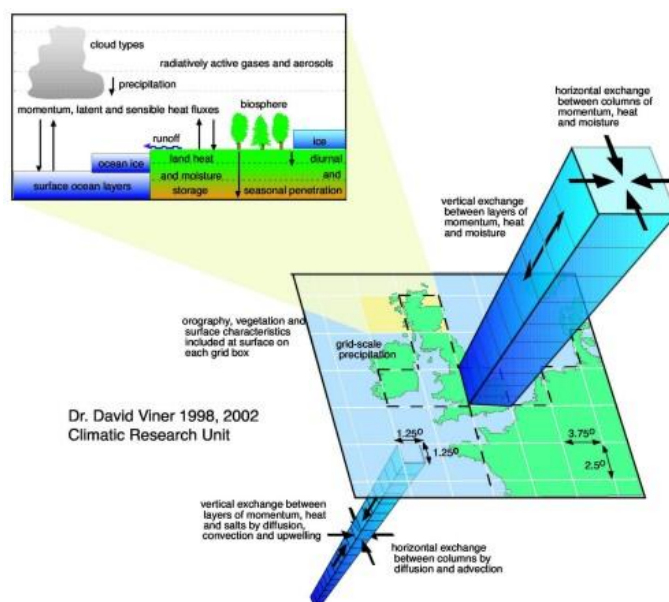
El Informe de Cambio Climático, Impacto y Vulnerabilidad en Europa (EEA, 2017a) describe cambios en temperaturas (Figura 8) y en el patrón estacional de precipitación a diferentes escalas para las eventos de lluvia individuales más intensas siendo más frecuentes.

A su vez se estima que la zona europea presentará aumentos en la temperatura más rápidos en promedio, en un mínimo de 1 a 4.5 °C y máximo de 2.5 a 5.5 °C, durante el invierno para las zonas norestes y en el sur en verano.

## 2.5 Modelos climáticos globales

Los Modelos de Circulación Generales (GCM, siglas en inglés) constituyen la primera línea de análisis de los modelos de cambio climático, y se pueden definir como una representación tridimensional de los componentes y variables de la atmósfera.

Estos sistemas consideran el área global total y las interacciones y reacciones entre los parámetros meteorológicos, hidrológicos y del clima. Por lo cual, el modelo se divide en regiones o malla sobre la superficie terrestre. El cálculo de la evolución se lleva a cabo a través de ecuaciones complejas que vinculan los diferentes sistemas y predicen las reacciones del sistema que caracteriza el estado climático global y sus variables (Figura 9).



**Figura 9.** Esquema de Modelos de Circulación Generales (Viner, 2018)

El modelo ECHAM5 es propuesto por el Instituto de Meteorología Max Planck de Alemania. Al ser creado como una modificación del European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) sus dos primeras siglas hacen referencia a esta investigación, el lugar de su parametrización está descrito en la tercera sigla, Hamburg; y finalizan sus siglas AM5 como el modelo atmosférico de quinta generación (Atmospheric Model v5).

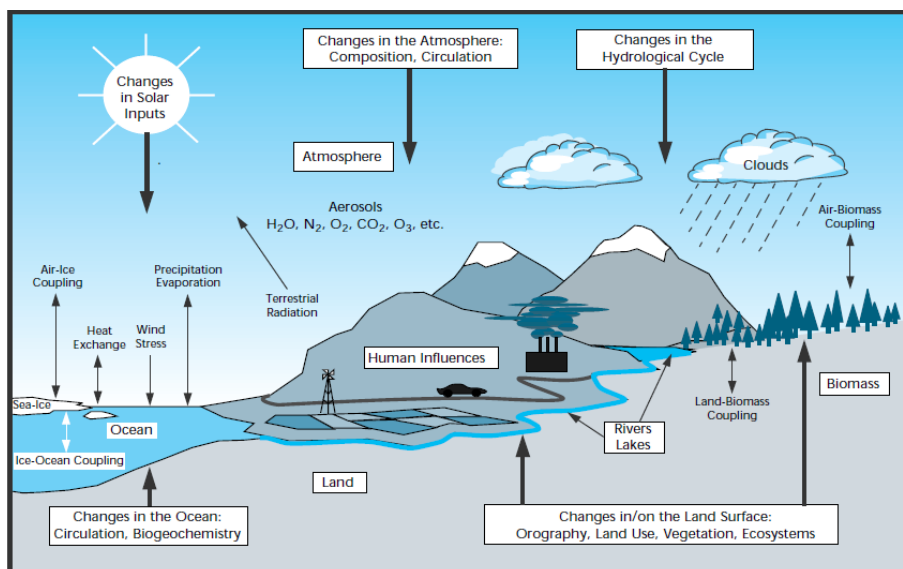
El modelo debido a las respuestas obtenidas en los diferentes análisis es uno de los modelos más ampliamente usados a nivel de estudios de cambio climático. Siendo la quinta generación de los sistemas planteados ha experimentado cambios sustanciales en las técnicas y parámetros de asociación al medio atmosférico (Figura 10). Considerando diferentes discretizaciones horizontales y verticales, integraciones de tiempo,



parametrización de los procesos en superficie, atmósfera y los medios hidrológicos (Roeckner et al., 2003).

Cada modelo global está creado en base a diferentes términos de simplificación de los fenómenos de interacción atmósfera, suelo y océanos, y su vinculación a través de estructuras numéricas, las parametrizaciones y los procesos acoplados.

A su vez la complejidad de las técnicas de resolución de las ecuaciones de vinculación permite determinar la flexibilidad de la reacción a cambios en el sistema de discretización espaciales y temporales, y sus términos vinculados no lineales para las rejillas de estudio.



**Figura 10.** Esquema de los componentes climáticos globales relevantes a los sistemas de cambio climático (Houghton et al., 1997)

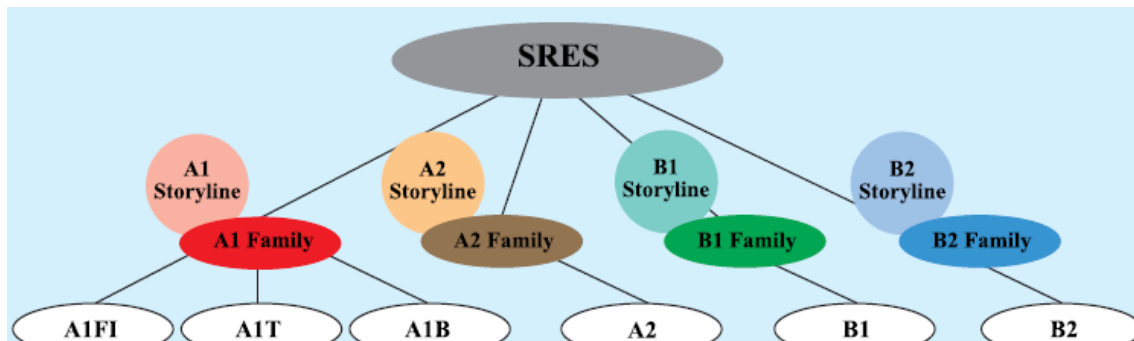
## 2.6 Modelo Regional

Debido a la resolución de los modelos globales, zonas con topografías complejas y contrastes amplios de los parámetros climáticos más relevantes precisan incluir modelos climáticos regionales (RCM, sigla en inglés) para reducir el área de estudio y obtener una mejor resolución, siempre dentro del modelo simulado a gran escala. Esto permite introducir los elementos altamente heterogéneos de la zona a modelar.

El trabajo utiliza el modelo RCA3 (Rossby Centre Atmosphere Model) elaborado por el Centro Rossby, unidad de modelización de cambio climático dentro del departamento de investigación del Instituto de Meteorología e Hidrología de Suecia (SMHI, Swedish Meteorological and Hydrological Institute). Con el propósito de proveer información más precisa de los eventos climáticos extremos en la zona de Europa, el modelo RCA3 introduce variables estacionales y diarias, como: temperatura, precipitación, velocidad del viento, nieve (Figura 11); a la vez que simula nubosidad y flujos en la radiación (Samuelsson et al., 2011). Uno de los cambios más importantes respecto a su predecesor es la incorporación de un esquema de superficie de cuadrículas, que permite la interacción y acoplamiento de varios descriptores: fracciones de océano, tierra o masas de agua dulce, tipo de vegetación o la presencia de campos nevados.



En base a las alternativas de cambio tecnológico en el sistema energético se categoriza en: fuentes de energía no fósiles (A1FI), no fósiles (A1T) o un equilibrio en todas las fuentes (A1B); siendo este último el escenario utilizado en este estudio.

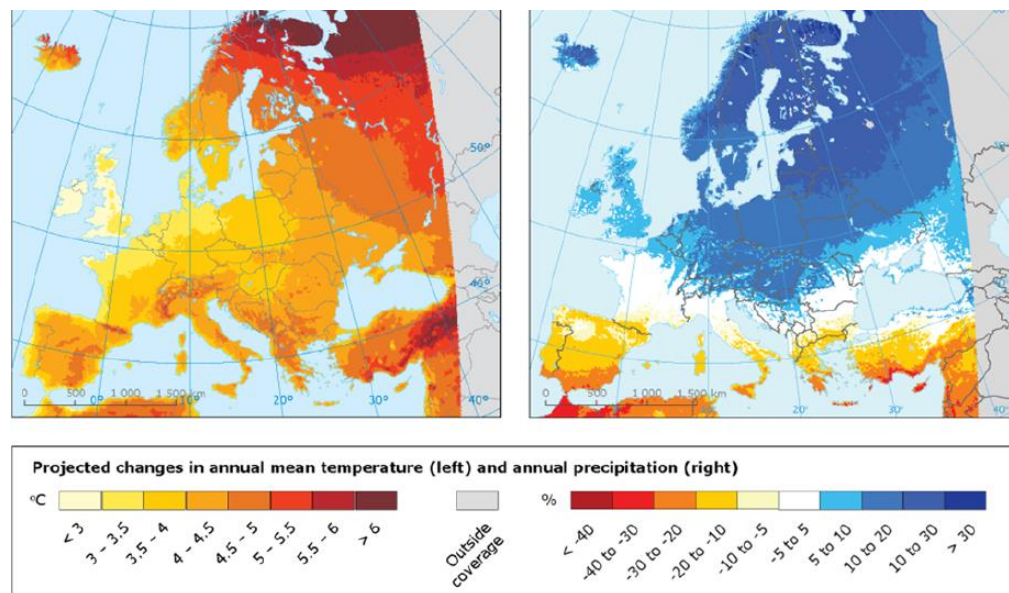


**Figura 12.** Esquema de los escenarios de emisiones de gases para el SRES (Nakicenovic et al., 2000)

## 2.8 Contexto climático regional

Las proyecciones regionales dinámicas permiten evaluar a partir de una comparativa de serie temporal referencial cómo evolucionan las variables climáticas más relevantes. Como resultado podemos ver un aumento global de las temperaturas en un promedio de 0.3 – 1.7°C para los escenarios de menor emisión y de 2.6 – 4.8°C para los escenarios de mayor emisión, según informes de la IPCC.

En la Figura 13, se puede distinguir las anomalías en la temperatura y precipitación para las regiones europeas, entre los periodos de 1961 y las proyecciones para el 2071.



**Figura 13.** Cambios proyectados en temperatura y precipitación para Europa (EEA, 2017b)

Para cada región de Europa se presentan diferentes predicciones de cambio climático. Pero de forma general, se han observado aumentos en la intensidad y frecuencia de la precipitación intensa y en las temperaturas en el periodo de 2002 – 2011 identifican un aumento más rápido que el promedio global (Tang et al., 2018).

En el EEA (2017b) se detallan los cambios esperados en las acciones climáticas a través de las regiones europeas. Para la zona Mediterránea se describen aumentos en las temperaturas extremas, disminución en las precipitaciones y aumentos en los riesgos debido a fenómenos climáticos.

- Aumento de los valores extremos de la temperatura
- Descenso en la precipitación y corrientes de ríos
- Incrementos en riesgos de sequías
- Incrementos en riesgo de pérdida de biodiversidad
- Incrementos en riesgos de incendios forestales
- Aumento de la demanda de agua en agricultura
- Aumento en mortalidad debido a olas de calor
- Aumento de la demanda de energía para refrigeración
- Múltiples riesgos climáticos

Al introducir estas variables en temas de estabilidad de laderas, se puede esperar una disminución del contenido promedio de agua en el suelo y del nivel freático. Pero el desarrollo de vías de infiltración permite la rápida generación de altas presiones durante los eventos de lluvias extremas en verano, en las cuales se espera un incremento en la intensidad y frecuencia de las precipitaciones. Como resultado, el riesgo de deslizamientos inducidos por la lluvia permanece; los eventos serán menos frecuentes, pero potencialmente más grandes.

### **3 Metodología**

#### **3.1 Plan de Trabajo General**

El plan de trabajo y la secuencia de ejecución se desarrolla en base a las siguientes etapas:

I Etapa: Revisión bibliográfica y síntesis de los antecedentes

Gestión de antecedentes y recursos

- a. Generación de propuesta conceptual preliminar

II Etapa: Análisis y estudio de los datos de precipitación y temperatura, entre otros factores atmosféricos

Análisis de las características de los modelos de cambio climático

- a. Modelos globales
- b. Modelos regionales
- c. Escenarios de emisiones
- d. Downscaling

III Etapa: Análisis del efecto del cambio climático considerando varios escenarios a través de Code Bright

Diseño y prueba del modelo hidro-termo-mecánico

- a. Selección y evaluación de las propiedades geomecánicas
- b. Creación de los archivos atmosféricos para los datos históricos y de proyección para las diferentes líneas de tiempo
- c. Establecer la geometría y caracterización temporal del medio
- d. Procesamiento de los datos y el modelo en Code Bright

Análisis de los datos de post-procesamiento

- a. Referencia de factor de seguridad en base a un talud infinito
- b. Análisis de data y verificación de indicadores
- c. Validación de los modelos y procedimientos

Análisis de los datos resultantes del modelo, gráficas y conclusiones de los datos muestrales

IV Etapa: Memoria de investigación

Realización de informe del proyecto

#### **3.2 Modelos de Cambio Climático**

El análisis de cambio climático se basa en los resultados del Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (PNACC) y la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) para escenarios de cambio climático particulares de España.

El estudio de pérdida de suelos para zonas montañosas desarrollado se basó en la referencia global ECHAM5, el modelo regional RCA3 y el escenario de emisiones A1B; para latitudes de 47 – 34 y longitudes de -12 – 6.5 lo que establece una malla de 53 x 75

pixeles, de los cuales el trabajo se centra en el punto de estudio 0.75 E; 42.5 N (SENET) de todo el conjunto, como se describe en la Figura 14. Donde se obtienen respuestas diarias con una resolución de  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ .



**Figura 14.** Puntos de referencia de la zona de estudio en Cataluña.

Este modelo evalúa las proyecciones globales, regionales y los escenarios de emisiones del SMHI (Swedish Meteorological and Hydrological Institute) y los proyectos de regionalización dinámica del EURO-CORDEX (Experimento de reducción de escala coordinada - Dominio Europeo). De lo cual se obtienen las variables detalladas en la Tabla 1, para una serie temporal diaria.

**Tabla 1.** Variables del proyecto de regionalización dinámica

Código	Parámetro
Precipitación	
Tmax	Temperatura máxima diaria a 2m
Tmin	Temperatura mínima diaria a 2m
Evp	Evaporación
Lwdown	Radiación de onda larga hacia abajo en superficie

Lwnet	Radiación neta de onda larga en superficie
MSLP	Presión media a nivel del mar
Psurf	Presión en superficie
Q2m	Humedad específica a 2m
Rh2hm	Humedad relativa a 2m
SLHF	Flujo de calor latente hacia arriba en superficie
Soiltmax	Temperatura máxima en superficie
Soiltmin	Temperatura mínima en superficie
Soilwup	Humedad de la capa del suelo 0.1 m por encima
Ssrutoff	Drenaje (escorrentía subsuelo)
Swdown	Radiación de onda corta hacia abajo en superficie
Swnet	Radiación neta de onda en superficie
T2m	Temperatura a 2m
Td2m	Temperatura del punto de rocío a 2m
W10max	Velocidad máxima diaria del viento a 10 m incluida las rachas

---

### 3.3 *Índices de cambio climático*

Dentro del estudio comparativo del modelo de predicción de cambio climático y debido al amplio volumen de información creada en el proceso se definen índices de estudio que permitan evaluar los extremos temporales, y permita un intercambio más sencillo dentro de la comunidad científica.

El Equipo de Expertos (ET) en detección de cambio climático e índices (ETCCDI, siglas en inglés) coordina a escala internacional el desarrollo y definición de los índices, su compilación y actualización.

Actualmente se definen un total de 27 índices básicos (Karl et al., 1999), donde las ecuaciones se basan en los valores de temperatura máxima y mínima diaria y la precipitación diaria. Algunos con ecuaciones de análisis descritas para todos los medios en general y otros que permiten la integración de condiciones más puntuales y deseables para la región de estudio.

**Tabla 2.** Índices de Cambio Climático

Índice		Descripción
FD	Número de días de heladas	Conteo anual de días en los que TN (temperatura mínima diaria) $< 0^{\circ}\text{C}$
SU	Número de días de verano	Conteo anual de días en que TX (temperatura máxima diaria) $> 25^{\circ}\text{C}$
ID	Número de días de congelación	Conteo anual de días en que TX (temperatura máxima diaria) $< 0^{\circ}\text{C}$
TR	Número de noches tropicales	Conteo anual de días cuando TN (temperatura mínima diaria) $> 20^{\circ}\text{C}$
GSL	Duración de la temporada de crecimiento	Anual (del 1 de enero al 31 de diciembre en el hemisferio norte (NH), del 1 de julio al 30 de junio en el hemisferio Sur (SH)) entre el primer lapso de al menos 6 días con temperatura media diaria $TG > 5^{\circ}\text{C}$ y primer lapso después del 1 de julio (1 de enero en SH) de 6 días con $TG < 5^{\circ}\text{C}$
TXx	Temperaturas máximas diarias	Valor máximo mensual de la temperatura máxima diaria
TNx	Temperaturas mínimas diarias	Valor máximo mensual de la temperatura mínima diaria
TXn	Temperatura máxima diaria mínima	Valor mínimo mensual de la temperatura máxima diaria
TNn	Temperatura mínima diaria mínima	Valor mínimo mensual de la temperatura mínima diaria
TN10p	Temperatura mínima diaria en el percentil 10	Porcentaje de días cuando TN $<$ percentil 10



TX10p	Temperatura máxima diaria en el percentil 10	Porcentaje de días cuando TX < percentil 10
TN90p	Temperatura mínima diaria en el percentil 90	Porcentaje de días cuando TN > percentil 90
TX90p	Temperatura máxima diaria en el percentil 90	Porcentaje de días cuando TX > percentil 90
WSDI	Índice de duración de olas de calor	Conteo anual de días con al menos 6 días consecutivos cuando TX > percentil 90
CSDI	Índice de la duración de fríos extremos	Conteo anual de días con al menos 6 días consecutivos cuando TN < percentil 10
DTR	Rango de temperatura diaria	Diferencia media mensual entre TX y TN
Rx1day	Precipitación máxima mensual de 1 día	Cantidad de precipitación diaria
Rx5day	Precipitación mensual máxima consecutiva de 5 días	Cantidad de precipitación para el intervalo de 5 días
SDII	Índice de intensidad de la precipitación simple	Cantidad de precipitación diaria en días húmedos ( $RR \geq 1$ mm)
R10mm	Precipitación diaria $\geq 10$ mm	Conteo anual de días cuando PRCP $\geq 10$ mm
R20mm	Precipitación diaria $\geq 20$ mm	Conteo anual de días cuando PRCP $\geq 20$ mm
R25mm	Precipitación diaria $\geq 25$ mm	Conteo anual de días cuando PRCP $\geq 25$ mm
DDC	Duración máxima de la temporada seca	Número máximo de días consecutivos con $RR < 1$ mm
CWD	Duración máxima de la temporada húmeda	Número máximo de días consecutivos con $RR \geq 1$ mm
R95pTOT	PRCP total anual cuando $RR > 95p$	Cantidad de precipitación diaria en un día húmedo sea el percentil 95 de precipitación en días húmedos en el período
R99pTOT	PRCP total anual cuando $RR > 99p$	Cantidad de precipitación diaria en un día húmedo sea el percentil 99 de

precipitación en días húmedos en el período

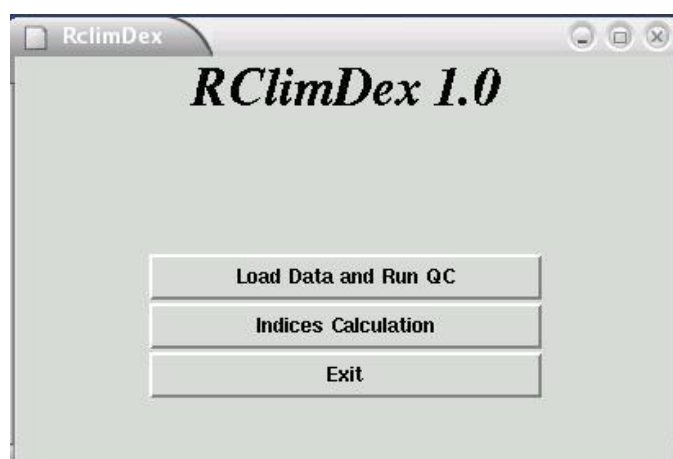
PRCPTOT	Precipitación total anual en días húmedos	Cantidad de precipitación diaria anual
---------	---	--

---

## RCLimDex

Para el cálculo de los índices de cambio climático se utiliza el programa RCLimDex (Figura 15) desarrollado por la Sección de Datos y Análisis Climáticos, de la Organización de Medio Ambiente y Cambio Climático, Canadá. El cual se ejecuta a través del software R, el cual es de uso amplio para problemas de análisis estadístico y gráficos (Zhang et al., 2018).

El objetivo principal del código es proveer una herramienta asequible que permita realizar un control de calidad de datos diarios de precipitación y temperatura; y en subsecuencia calcular los índices climáticos para eventos extremos en concordancia con los procedimientos estipulados por la ETCCDI.



**Figura 15.** Interfaz RCLimDex

Tanto para el control de calidad como para el cálculo de los índices se carga un archivo delimitado por espacios (.csv .txt) que incorpore las columnas de datos para: año, mes, día, precipitación (mm), temperatura máxima (°C) y temperatura mínima (°C).

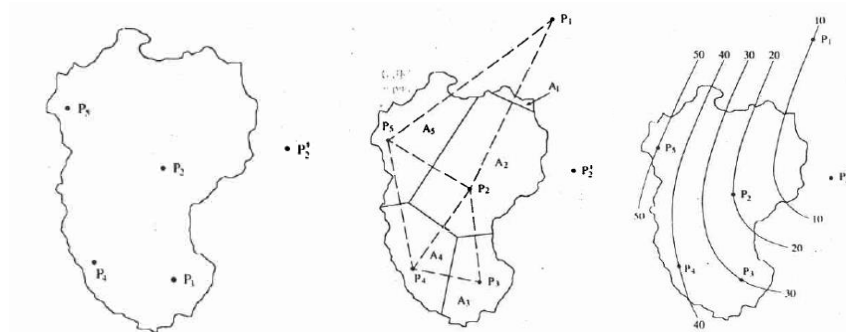
El control de calidad de datos busca determinar la existencia de valores nulos (-99.9/NA) y advertir de aquellos valores que estén en rangos irrazonables, como:

- Valor de precipitación diaria menor a cero milímetros.
- Temperatura máxima diaria inferior a la temperatura mínima diaria.
- Valores de temperatura diarios superiores a 70°C o inferiores a -70°C
- Días de salto. (es decir, el 29 de febrero)
- Todos los valores correspondientes a una fecha imposible.
- Cualquier valor no numérico.

Una vez se determine que la matriz de datos ha resultado en un proceso de calidad exitoso se ejecuta el proceso de cálculo de índices, donde los gráficos completos de los 27 índices para los periodos de 1961-2000 y 2011-2100 del modelo SMHI se detallan en la sección de Anexos.

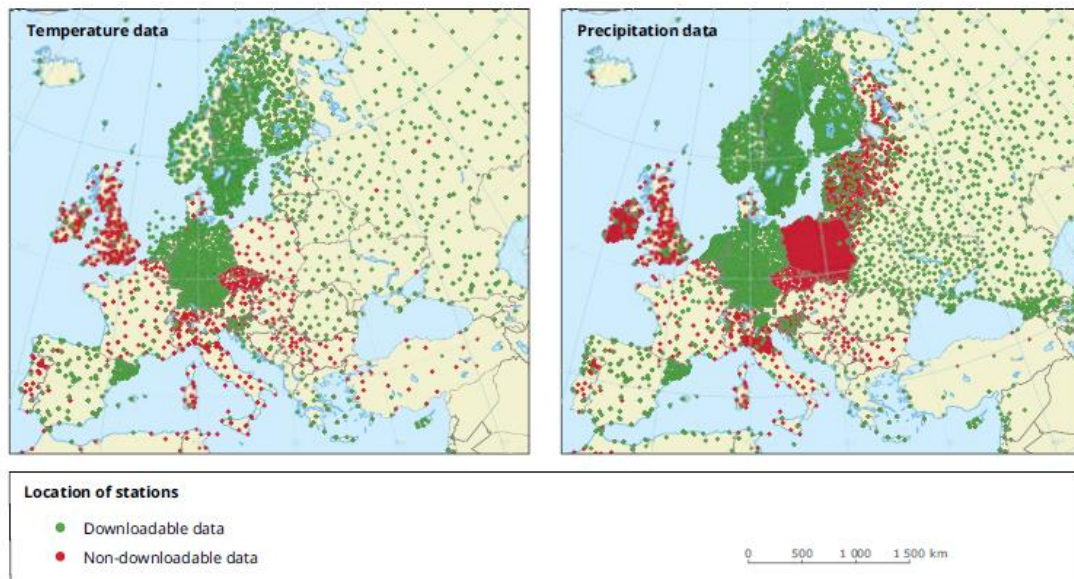
### 3.4 Correlación a datos observacionales

De acuerdo con Chow et al. (1988) la estimación de precipitaciones para regiones delimitadas requiere de una cobertura amplia de puntos de registros que permitan el uso de diferentes metodologías de análisis que ofrezcan productos finales representativos del área. Esto debido a la complejidad de las variaciones de las precipitaciones tanto en espacio y tiempo de los patrones atmosféricos locales. (Figura 16).



**Figura 16.** Procedimiento de promedio por área de precipitaciones (Chow et al., 1988)

Es por ello, que a nivel de la región de estudio se deben contemplar las diferentes fuentes disponibles de información atmosférica recopilada en el histórico compatible con los modelos de predicción de cambio climático.



**Figura 17.** Estaciones con acceso a datos de precipitación y temperatura (Van Der Schrier et al., 2013)

Existen fuentes de estaciones meteorológicas y estudios satelitales, que en general pueden reflejar bajos niveles de confianza dependiendo de la cantidad de data, el área de estudio o el nivel de las rejillas de análisis.

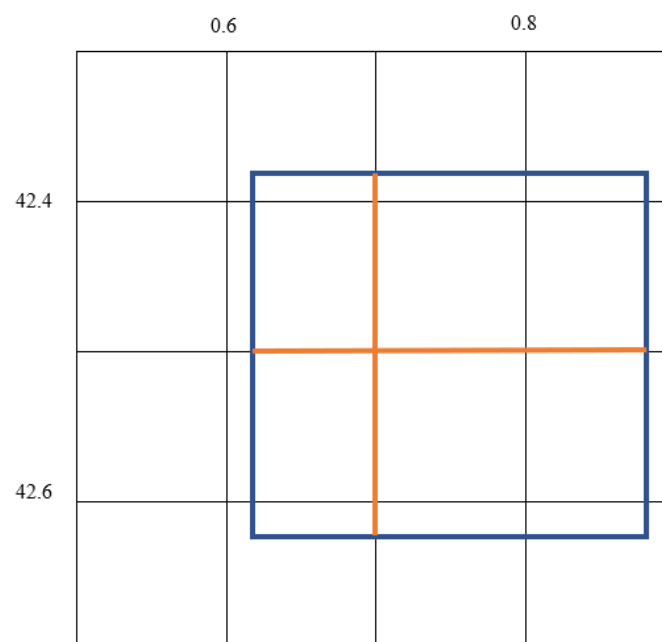
A nivel de la región se dispone de un número limitado de información, y a niveles regionales de Europa (Figura 17) la disponibilidad es limitada para la mayoría de los sectores. Estudios de compatibilidad y correlación requerirían trabajos de fortalecimiento de las diferentes fuentes de información meteorológica.

Uno de los reanálisis utilizados comúnmente, denominado Spain02, para relacionar los valores históricos climáticos de España (Turco et al., 2017) el cual fue desarrollado a través de la Universidad de Cantabria y AEMET.

Consiste en una matriz de datos de precipitación y temperatura con una resolución de  $0.2^\circ$  basada en registros de 2756 estaciones de control para un histórico de 1950-2008 (Herrera et al., 2010). Los estudios de reducción de escala realizados comparan los valores principales de los índices de precipitación a una serie de modelos regionales de cambio climático, donde el modelo SMHI muestra una de las desviaciones menores a la data observacional.

La matriz de datos del Spain02 se distribuye a través del AEMET y se encuentra en formato netCDF, esto permite que el archivo incluya información sobre los datos que contiene, su recopilación, unidades y la línea temporal para elementos geo-referenciados.

Para buscar la correlación del cuadrante de referencia del modelo predictivo utilizado en este estudio ( $0.75^\circ$  E;  $42.5^\circ$  N) de una resolución de  $0.25^\circ$  este se ubica en la posición correspondiente en la malla lo que representa la intervención de 4 de los cuadrantes, que bajo los procedimientos de promedio del área de datos atmosféricos descrito por Chow et al. (1988) para diferentes porcentajes (Figura 18).

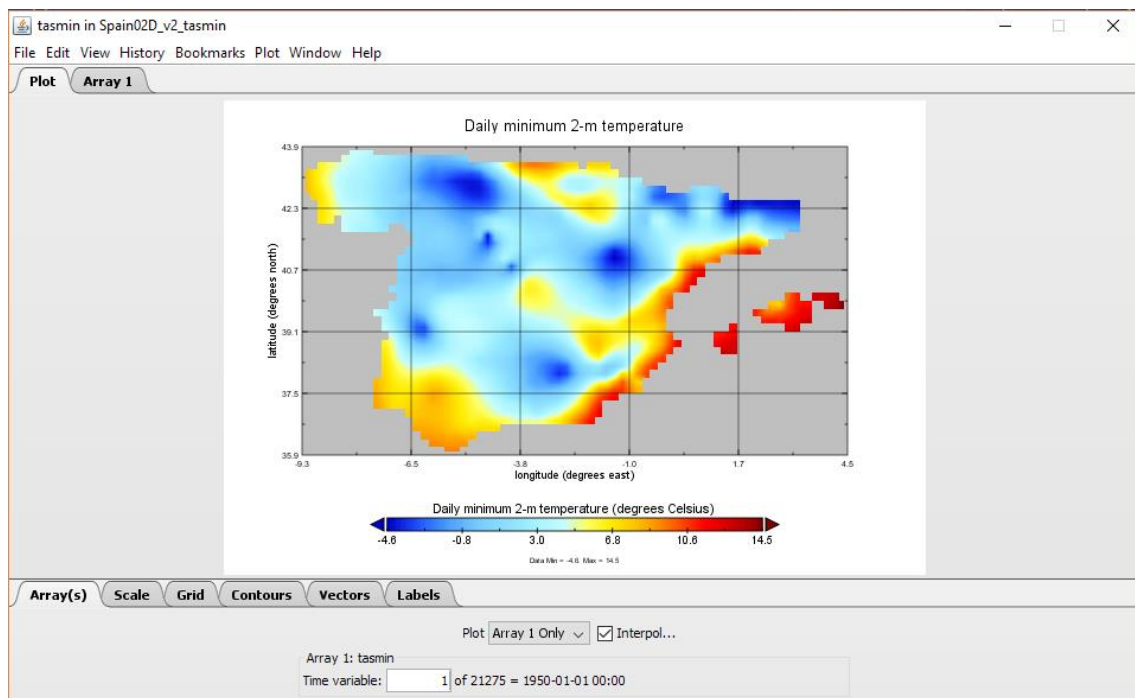


**Figura 18.** Matriz de datos Spain02 para la zona de estudio

### 3.4.1 Gestión de los datos

netCDF (network Common Data Form) permite almacenar datos en forma de matrices, creado por Unidata de la Corporación Universitaria de Investigación Atmosférica (UCAR). Se utiliza como el formato preferente de intercambio de información atmosférica (temperatura, la humedad, la presión, la velocidad del viento) geo-referenciados y su variabilidad en la línea del tiempo.

La extracción de los datos necesarios se realiza a través del software Panoply desarrollado por la División de ciencias de la Tierra de la NASA, para formatos netCDF, HDF, GRIB y otros tipos de formatos de datos. El cual permite plotear bases de datos climáticos geo-referenciados de latitud-longitud, latitud-vertical, longitud-vertical, tiempo-latitud o matrices de tiempo-vertical de variables multidimensionales (Figura 19).



**Figura 19.** Visualización de la matriz Spain02 en una aplicación multiplataforma de visualización netCDF (Panoply)

Esta información es sometida al mismo tratamiento del modelo de predicción SMHI a través del RCLimDex para obtener los valores de los índices principales y así obtener una comparación de los extremos locales de mayor impacto.

### 3.5 Modelización Termo-hidráulica en Code Bright

El elemento principal para llevar a cabo la modelización es el código del programa Code Bright desarrollado por el Departamento de Ingeniería Geotécnica y Geociencias – UPC. Este permite ejecutar análisis acoplados mecánicos, hidráulicos y térmicos de los medios geológicos.

A su vez el preprocesamiento y post-procesamiento es ejecutado a través de la plataforma GiD del Centro Internacional de Métodos Numéricas en Ingeniería (CIMNE, siglas en ingles) que permite introducir toda la data necesaria de acoplamiento del problema como la geometría, condiciones y materiales; la creación de la malla de elementos finitos y su ejecución.

### 3.5.1 Columna de suelo bajo acciones climáticas

Con el objetivo de modelizar los parámetros climáticos, geomecánicos y termo-hidráulicos de una columna de suelo bajo acciones climáticas, las consideraciones de geometría y condiciones iniciales de diferentes taludes tipo a estudiar, de los cuales se desarrolla un modelo hidro-termo-mecánico para el estudio de las interacciones de los eventos atmosféricos y las propiedades geomecánicas del terreno, que permita establecer los eventos desencadenantes de inestabilidad en el talud.

Este caso trata el efecto de las cargas atmosféricas aplicadas en la parte superior de una columna unidimensional de suelo. Donde se integran las componentes de impacto de la estabilidad del talud de estudio, a través de los sistemas de flujo de calor (radiación), agua (precipitación, escorrentía, evapotranspiración) y de gas.

Las subrutinas de Code Bright calcula las condiciones de contorno, evaporación, precipitación, radiación y flujos de energía convectiva y advectiva. Estos están expresados bajo las siguientes ecuaciones de flujo como variables de estado (Division of Geotechnical Engineering and Geosciences, 2018).

#### Balance de masas

Para el medio poroso se reconoce la interacción de las partículas sólidas, agua y aire. Lo que debe incluirse en las postulaciones de interacción hidráulicas y térmicas del medio. Las variables de estado establecen en base a la presión líquida ( $P_l$ ), presión de gas ( $P_g$ ) y la temperatura (T).

- Balance de agua (w)

Este parámetro contempla tanto el estado líquido (l), como de gas (g) del agua en el medio poroso. El cual se consigue bajo los parámetros de fracción másica, densidad, saturación, porosidad y flujos totales.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\omega_l^w \rho_l S_l \phi + \omega_g^w \rho_g S_g \phi) + \nabla(j_l^w + j_g^w) = f^w \quad (3)$$

- Balance de energía (E)

En segunda instancia también se busca el balance de energía interna del medio para los estados sólidos (s), líquidos y gaseosos.

$$\frac{\partial}{\partial t}(E_s \rho_s (1 - \phi) + E_l \rho_l S_l \phi + E_g \rho_g S_g \phi) + \nabla(i_c + j_{Es} + j_{El} + j_{Eg}) = f^Q \quad (4)$$

Los valores de energía presentan variantes debido a la naturaleza conductiva del medio y los flujos de advección causados por movimientos de las masas.

#### Condiciones atmosféricas

##### Flujo de aire

$$j_a = \omega_g^a q_g = (1 - \omega_g^w) q_g \quad (5)$$

### Flujo de gas

$$q_g = \gamma_g(P_g - P_{ga}) \quad (6)$$

$P_{ga}$  es la presión atmosférica y  $\gamma_g$  el coeficiente de filtración.

### Flujo de agua

$$j_w = k_p P + k_E E + j_g^w + j_{sr} \quad (7)$$

#### Escorrentía superficial

$$j_{sr} = \gamma_w(P_l - P_{ga}) \quad (8)$$

#### Evaporación

$$E = \frac{k^2 v_a \varphi}{\left(\ln \frac{z_a}{z_0}\right)^2} (\rho_{va} - \rho_v) \quad (9)$$

#### Flujo de vapor

$$j_g^w = \omega_g^w q_g \quad (10)$$

En estas ecuaciones  $\rho_{va}, \rho_v$  representan la humedad absoluta de la atmosfera y en la condición de contorno,  $k$  es la constante Von Karman,  $\varphi$  siendo un factor de estabilidad,  $v_a$  la velocidad del viento,  $z_0$  longitud de rugosidad,  $z_a$  representa la altura de la pantalla en la cual se miden la velocidad del viento y la humedad absoluta.

### Flujo de calor

$$j_e = k_{rad} R_n + H_s + H_c \quad (11)$$

#### Radiación neta

$$R_n = (1 - A_l) R_g + \varepsilon R_a - \varepsilon \sigma T^4 \quad (12)$$

#### Flujo de energía (advección)

$$H_s = \frac{k^2 v_a \varphi}{\left(\ln \frac{z_a}{z_0}\right)^2} \rho_{ga} C_a (T_a - T) \quad (13)$$

Flujo de energía convectiva

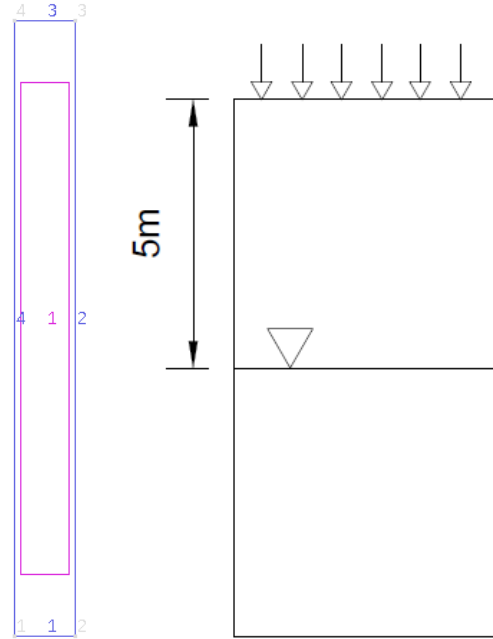
$$H_c = h_v(E + j_g^w) + h_{la}(P + j_w^l) + h_{a0}j_a \quad (14)$$

Para los cuales  $R_g$  es la radiación directa de onda corta,  $R_a$  radiación atmosférica de onda larga,  $A_l$  reflectividad difusiva,  $\varepsilon$  emisividad,  $\sigma$  constante Stefan-Boltzman,  $C_a$  calor específico del gas y  $h_v, h_{la}, h_{a0}$  son energía libre del vapor, agua líquida y aire, respectivamente.

### 3.5.2 Geometría y datos generales

El planteamiento de resolución del problema se realiza a través de un modelo unidimensional del talud para las condiciones climáticas como elemento de acción en la superficie. Por lo cual, se considera una columna de suelo de 50 metros de altura, con un nivel freático a 5m por debajo de la superficie para las condiciones iniciales. Considerando tres tipologías de materiales de suelo y sus parámetros determinantes: arena mal graduada, limo y arcilla (Figura 20).

Otro enfoque para se estudia al incorporar elementos de resistencia heterogénea, esto a través del modelamiento de una columna de 47 metros de arcilla y la capa superior de 3 metros en base a las características del limo o la arcilla, bajo los estados de nivel freático y condición de contorno del modelo previo.



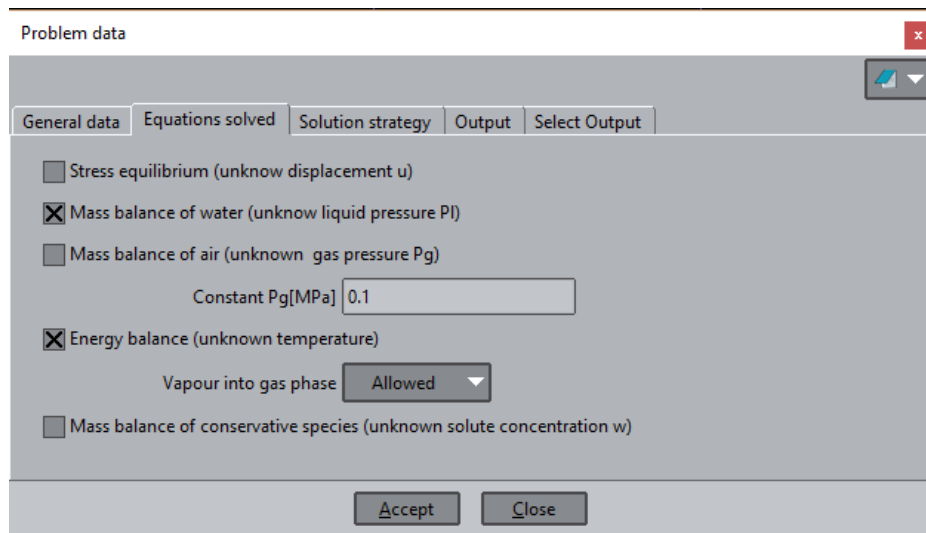
**Figura 20.** Columna unidimensional para el modelo termo-hidráulico.

Los campos de resolución del problema se estiman para las ecuaciones de balance de la masa del agua y balance de energía (Figura 21), los cuales son capaces de evaluar los cambios en los procesos térmicos (radiación, temperatura) e hidráulicos (precipitación)



para los cuales se someterá el talud para la línea de tiempo a evaluar. Donde las variables de estado describen un flujo no isotérmico de dos fases de agua que permite vapor para una fase gaseosa a presión constante.

A su vez se especifican los valores para la estrategia de solución del sistema (Figura 22). En el cual se especifican los parámetros para la resolución de las ecuaciones diferenciales parciales no lineales, donde la metodología de solución numérica adoptada es por medio de Newton-Raphson para discretizaciones espaciales para elementos finitos y temporales para diferencias finitas.



**Figura 21.** Ecuaciones por resolver para el modelo termo-hidráulico.

Dentro de las ramas de ingeniería se establecen representaciones de fenómenos en base a soluciones de ecuaciones en derivadas parciales en base a su comportamiento espacial y temporal, y a condiciones iniciales y de frontera; las cuales no pueden resolverse en base a las convenciones estándar. Esto nos lleva a establecer metodologías de resolución en base a métodos numéricos que nos permiten aproximarnos a la resolución de los problemas prácticos del campo.

Uno de los primeros pasos es determinar la discretización que representa el medio a trabajar en diferencias finitas, esto nos brinda un entorno finito de celdas o nodos, en lugar de sistemas infinitesimales. De allí que, de acuerdo con el comportamiento del sistema, se establezcan los parámetros de dicha discretización en los campos espaciales y de tiempo.

Establecer estos sistemas por nudos o celdas nos permiten trabajar en relación de sistemas de ecuaciones finitas y visualizar la evolución de la solución a través de una malla de puntos interconectados y sus fluctuaciones respecto a las derivadas parciales.

En base a las condiciones de las ecuaciones fundamentales se establecen ecuaciones individuales de forma algebraica representativas del nodo y sus relaciones con celdas vecinas.

Problem data

General data Equations solved **Solution strategy** Output Select Output

Epsilon (intermediate time for nonlinear functions) 1

Theta (intermediate time for implicit solution) 1

Time step control (see manual) 1

Max number of iterations per time step 10

Solver type direct LU+Back3

Elemental relative permeability computed from Average nodal degrees of saturation

Max Abs PI[MPa] 1e-3

Max Nod Water Mass Bal[kg/s] 1e-10

PI Iter Corr[MPa] 1e-1

Max Abs Temp[C] 1e-3

Max Nod Energy Mass Bal[J/s] 1e-10

Temp Iter Corr[C] 1e-1

Convergence criterion On nodal correction or residual

Accept Close

**Figura 22.** Parámetros de la estrategia de solución.

## Parámetros constitutivos del material

Al definir el material dentro del modelo atmosférico se introducen las siguientes leyes hidráulicas y térmicas, y los parámetros que los describen adoptados para el modelo.

### Curva de retención

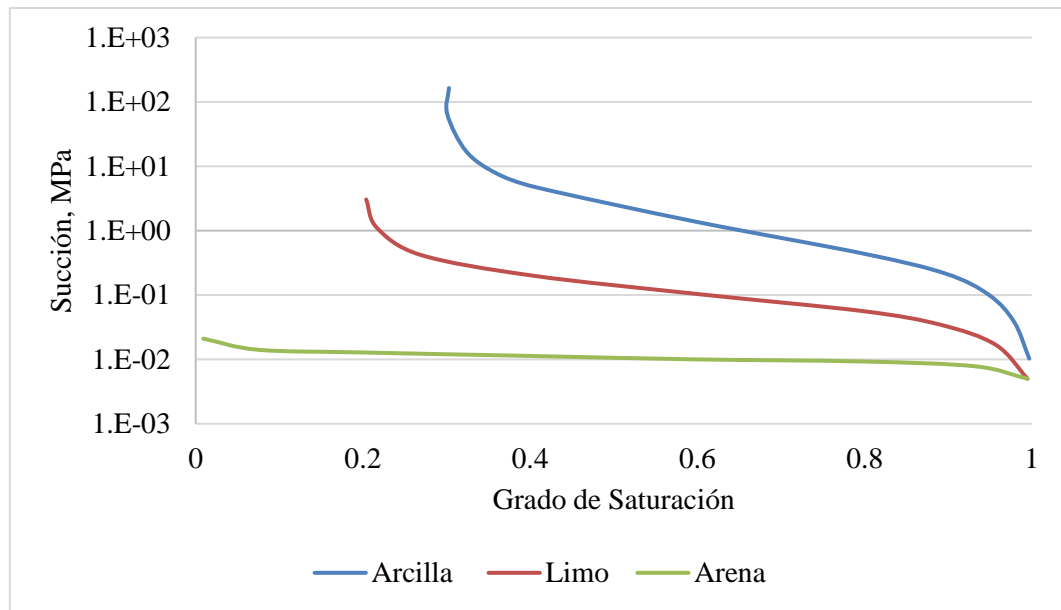
Presión capilar versus el grado de saturación bajo el modelo Van Genuchten, con el cual se consigue obtener los parámetros para evaluar el modelo numérico en base a flujos y transporte de masas en las zonas no saturadas de la columna de suelo. Los trabajos de Alonso et al. (1992) describen las curvas de retención para tres materiales: arena mal graduada, limo y arcilla (Figura 23).

Esta se relaciona con la ecuación gobernante del modelo Van Genuchten, como sigue:

$$S_e = \frac{S_l - S_{rl}}{S_{ls} - S_{rl}} = \left( 1 + \left( \frac{P_g - P_l}{P} \right)^{\frac{1}{1-\lambda}} \right)^{-\lambda} \quad (15)$$

$$P = P_0 \frac{\sigma}{\sigma_0} \quad (16)$$

Dentro de la descripción hidráulica y térmica de los modelos constitutivos del material permite ingresar los parámetros descritos en la Tabla 3.



**Figura 23.** Curvas de Retención para los suelos tipo a estudiar

**Tabla 3.** Parámetros de la Curva de Retención Van Genuchten para los suelos de estudio

	Arena	Limo	Arcilla
$P_0$	0.01	0.1	1
$\sigma_0$	0.072	0.072	0.072
$\lambda$	0.872	0.405	0.107
$S_{rl}$	0.02	0.2	0.3
$S_{ls}$	1	1	1

### Permeabilidad intrínseca

Para un medio continuo esta descrito según el modelo Konezy, definida bajo la ecuación 17. Este se define como el coeficiente que establece el grado para el cual un flujo puede atravesar un medio poroso o fracturado; mide la facilidad para que un fluido circule a través del medio. La permeabilidad intrínseca o absoluta dependerá de las características del terreno de allí que sus unidades estén en referencia del área:  $\text{cm}^2$ ,  $\text{m}^2$  (Powers et al., 2005).

$$k = k_0 \frac{\varphi^3}{(1 - \varphi)^2} \frac{(1 - \varphi_0)^2}{\varphi_0^3} \quad (17)$$

Este parámetro puede registrar grandes variaciones dependiendo del terreno, desde el punto de la microestructura como el arreglo de las partículas y a su vez la macroestructura como la estratificación del medio. Las características con mayor influencia son:

- Granulometría: la distribución de los tamaños de granos del suelo, la permeabilidad disminuye cuanto más pequeñas sean las partículas del suelo.
- Densidad del suelo: cuanto más denso sea el terreno menor será su volumen de vacíos y se reducirá su permeabilidad.
- Forma y orientación de las partículas: las condiciones de sedimentación dan lugar a orientaciones preferenciales.

En base a la permeabilidad, también influyen ciertos aspectos del fluido como su viscosidad y con esto la temperatura; a su vez el grado de saturación y la concentración de iones pueden influir en su magnitud.

Para determinar este parámetro se encuentran detallados diferentes fórmulas empíricas dependiendo del medio grano grueso o fino. A su vez puede depender de la naturaleza del depósito del suelo y la dirección del flujo. Este valor se puede obtener mediante ensayos de laboratorio de carga constante o variable. Para la modelización se utilizan los siguientes valores descritos en la Tabla 4 (Alonso et al., 1992; Chow et al., 1988).

**Tabla 4.** Parámetros de Permeabilidad Intrínseca

	Arena	Limo	Arcilla
$(k_{11})_0$	1e-12	1e-14	1e-16
$(k_{22})_0$	1e-12	1e-14	1e-16
$(k_{33})_0$	1e-12	1e-14	1e-16
$\varphi_0$	0.44	0.47	0.47
$\varphi_{min}$	0.01	0.01	0.01

### Permeabilidad relativa para la fase líquida

La permeabilidad líquida se ve afectada por los cambios en el grado de saturación del medio poroso, lo cual está ligado a los valores de succión a través del modelo Van Genuchten (Genuchten, 1980). Esto permite vincular los valores de la permeabilidad relativa los cambios de la succión a través una ecuación similar a la de la curva de retención, bajo los valores de la función de forma y la saturación del medio.

$$k_{rl} = \sqrt{S_e} \left( 1 - \left( 1 - S_e^{1/\lambda} \right)^\lambda \right)^2 \quad (18)$$

Por lo cual se adoptan valores similares a los parámetros para el primer apartado de curva de retención, detallados en la Tabla 5.

**Tabla 5.** Parámetros de Permeabilidad Relativa para la fase líquida

	Arena	Limo	Arcilla
$\lambda$	0.627	0.270	0.083
$S_{ls}$	1	1	1

### Permeabilidad relativa para la fase de gas

Los valores de permeabilidad relativa para la fase de gas se estiman a través de relaciones únicas con los cambios en el grado de saturación. Esto se logra a través de las relaciones de Potencia generalizada estudiadas por Wyllie (1962) para medios porosos (arena no consolidada bien clasificada), como se describe en la siguiente ecuación.

$$k_{rg} = AS_{eg}^{\lambda}$$

$$k_{rg} = S_{eg}^3$$
(19)

### Flujos difusivos de vapor

Debido a la presencia de diferentes fases en el medio poroso debemos reconocer la transferencia de materia independiente de la convección del medio al incluir la difusión molecular de vapor o aire en fase de gas. Este movimiento en la sustancia se debe a gradientes de concentraciones, presiones o temperatura, para fases estáticas o en movimiento.

La difusión de las moléculas esta descrita bajo las relaciones de la densidad del flujo a la viscosidad (Ley de Newton), la conductividad calórica (Ley de Fourier) y la difusividad (Ley de Frick). Este último es un parámetro de proporción entre la densidad del flujo y el gradiente que induce el movimiento aleatorio de las moléculas.

Bajo la Teoría Cinética de los gases se pueden obtener diferentes fórmulas de estimación del valor de difusividad, especialmente para cambios en valores de temperatura y presión. Para este estudio tomas como términos constantes:  $D$  ( $5.9 \times 10^{-6}$  Pa m<sup>2</sup>/s K<sup>n</sup>) y  $n$  (2.3).

$$D_{\alpha}^i = D \left( \frac{(273.15 + T)^n}{P_g} \right)$$
(20)

### Flujo conductor de calor

El flujo de calor a través del medio poroso está sujeto a tres fenómenos: la conducción del medio sólido, la convección de los flujos y la radiación electromagnética de las partículas. Donde las distintas fases sólidas, líquidas y de gas intervienen de mayor o menor medida en la transferencia de calor para las diferentes acciones.

Esta habilidad de transmitir calor se debe a la respuesta individual de estos estados, las interrelaciones entre las fases y en el caso de las convecciones y la radiación, la geometría de la microestructura y la matriz sólida, como el grado de saturación, juegan un papel importante en los cambios de estados completamente secos, a parcialmente saturados y saturados, donde los efectos de estos parámetros aumentan exponencialmente.

Los valores últimos de la transmisividad térmica (Tabla 6) se obtienen por medio la ponderación geométrica, donde se toman como referencia los resultados de ensayos de Ghanbarian y Daigle (2016).

- Conductividad térmica dependiente en la porosidad y la temperatura

$$\lambda_d = \lambda_s^{1-\varphi} \lambda_{sat}^{\varphi} \quad (21)$$

$$\lambda_{sat} = \lambda_s^{1-\varphi} \lambda_{liq}^{\varphi} \quad (22)$$

- Conductividad térmica dependencia al contenido de agua

$$\lambda = \lambda_{sat} \sqrt{S_l} + \lambda_d (1 - \sqrt{S_l}) \quad (23)$$

**Tabla 6.** Parámetros de Flujo conductor de calor

	Arena	Limo	Arcilla
$\lambda_d$	0.253	0.225	0.222
$\lambda_{sat}$	2.186	1.401	1.367

### 3.6 Condiciones de contorno y datos de entrada

Las condiciones de contorno para los procesos de flujo requieren la definición de parámetros de estado para los componentes de agua, aire y energía; y sus variables dependientes; e introducir los datos de medidas meteorológicas para una línea de tiempo. Estos se incorporan a las ecuaciones de balance de flujos, y así obtener la entrada y salida del componente del modelo.

#### Estado inicial

Se asignan las incógnitas iniciales a la superficie al considerar las presiones líquidas, presiones del gas y temperatura en una distribución lineal con sus respectivos puntos iniciales y finales.

Estos valores se obtienen al determinar el punto de localización del nivel freático, siendo una distribución lineal a lo largo de toda la columna el cambio de presión líquida se calcula en base a que el punto de succión ( $P_g - P_l$ ) sea igual a cero. Los valores de presión de gas y temperatura se mantienen constantes.

Los valores para una columna de 50 metros con un nivel freático a 5 metros por debajo de la superficie son los siguientes:

	Pl (MPa)	0.05
Punto Inicial	Pg (MPa)	0.10
	T (°C)	20
	Pl (MPa)	0.55
Punto Final	Pg (MPa)	0.10
	T (°C)	20
	Coordenada Y inicial (m)	50

### Porosidad inicial

Valores menores a 1 para la porosidad inicial (Tabla 7) son asignados a la superficie en base al material de estudio. Este parámetro es condicionante de una serie de términos de las leyes constitutivas y las ecuaciones de balance de agua y energía. La dependencia al término de porosidad está ligada a los procesos de disolución y precipitación a través de los cambios en el grado de saturación y los términos de conductividad térmica. A través de los procesos de conducción térmica, almacenamiento de agua y gas y los mecanismos de transferencia, por medio de los cambios en la conductividad hidráulica.

**Tabla 7.** Valores de porosidad inicial

Porosidad	Arena	Limo	Arcilla
$\varphi_0$	0.44	0.47	0.47

### Condiciones de flujo del contorno

El primer componente de flujo en la base de la columna describe un estado constante a lo largo del modelo, en lo cual se describen las presiones líquidas, de gas y temperatura, y el factor de paso por el elemento asignado.

Para una condición impermeable, se establecen los valores por defecto (todos los términos equivalen a cero).

Para permitir una salida de masa de la columna se prescriben los valores en términos positivos, lo cual indica solo salida del elemento. Para la sección de “condiciones” dentro de GiD, para elementos de línea y la sección de caudales de flujo, se considera lo siguiente:

Pg (MPa)	0.1
Gamma de gas (kg/s MPa)	$1 \times 10^6$
Pl (MPa)	0.55
Gamma del líquido (kg/s MPa)	$1 \times 10^6$
Temperatura (°C)	20
Gamma del calor (J/s C)	$1 \times 10^5$

La condición de flujo de entrada de la superficie debido a las acciones climáticas se establece de forma similar, a través de sección atmosférica para el elemento de línea en la parte superior de la columna. Esto permite incluir cambios en el balance de masa de agua y energía para los cambios inducidos por los factores climáticos, bajo los términos de precipitación, radiación, evaporación y las interacciones con el suelo (Tabla 8).

La información inicial incluye los términos necesarios para cálculos de radiación, caudales de entrada a la columna específicos para la zona de estudio y la estimación de la evaporación y los flujos de energía.

**Tabla 8.** Parámetros atmosféricos de la zona de estudio

Latitud, radianes	0.73958
Tiempo de inicio del otoño, s	2.29824e7
Tiempo al mediodía, s	43200
Longitud de asperezas, m	0.2
Altura de la pantalla, m	2.0
Factor de estabilidad, kg/m <sup>3</sup>	1.0
Densidad del gas atmosférico, kg/m <sup>3</sup>	1.225
Albedo seco	0.15
Albedo húmedo	0.10
Gamma de gas, kg/m <sup>2</sup> /s/Mpa	1e6
Gamma del líquido, kg/m <sup>2</sup> /s/Mpa	-1e6



Factor multiplicador de la precipitación	1.0
Factor multiplicador de la radiación	1.0
Factor multiplicador de la evaporación	1.0
Tipo de radiación	3.0
Fracción de la vegetación	0

### 3.6.1 Datos atmosféricos

La condición de flujo atmosférica establecida en el ítem anterior permite a su vez que los archivos atmosféricos del punto de estudio sean evaluados en el modelo para diferentes líneas de tiempo (Tabla 9).

Este archivo describe el tamaño de la matriz en la primera fila de información, y los valores para cálculos con información para interpolación (1) o simulación (0) del estado atmosférico para los tiempos en cada paso.

La entrada de datos atmosféricos se realiza a través de un archivo ASCII con una referencia “atm.dat” (Figura 24) para la línea de tiempo a analizar, las variables se listan en la Tabla 8 y el esquema del archivo.

Este archivo es construido a través de los valores del modelo climático regional del SMHI, y sus unidades convertidas para asegurar la compatibilidad con el sistema de Code Bright.

**Tabla 9.** Datos atmosféricos variables en el tiempo.

Datos	Unidades
Temperatura atmosférica, $T_a$	°C
Presión de gas atmosférico, $P_{ga}$	MPa
Humedad Relativa, $H_r$	-
Radiación, $R_n$	$J/m^2 \cdot s$
Índice de nubosidad, $I_n$	-
Precipitación, P	$kg/m^2 \cdot s$
Velocidad del viento, $v_a$	m/s

	<i>Ta</i> (°C)		<i>Pga</i> (Mpa)		<i>Hr</i>		<i>Rn</i> (J,m-2,s-1)		<i>In</i>		<i>P</i> (kg,m-2,s-1)		<i>va</i> (m,s-1)	
Flag	Number of lines	Number of columns												
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Annual mean	0	x_am	0	x_am	0	x_am	0	x_am	0	x_am	0	x_am	0	x_am
Annual ampl	0	x_aa	0	x_aa	0	x_aa	0	x_aa	0	x_aa	0	x_aa	0	x_aa
Annual gap (s)	0	x_ag	0	x_ag	0	x_ag	0	x_ag	0	x_ag	0	x_ag	0	x_ag
Daily ampl	0	x_da	0	x_da	0	x_da	0	x_da	0	x_da	0	x_da	0	x_da
Daily gap (s)	0	x_dg	0	x_dg	0	x_dg	0	x_dg	0	x_dg	0	x_dg	0	x_dg
Unused	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Measures...	ti (s)	xi	ti (s)	xi	ti (s)	xi	ti (s)	xi	ti (s)	xi	ti (s)	xi	ti (s)	xi
Measures...	ti (s)	xi	ti (s)	xi	ti (s)	xi	ti (s)	xi	ti (s)	xi	ti (s)	xi	ti (s)	xi
Measures...	ti (s)	xi	ti (s)	xi	ti (s)	xi	ti (s)	xi	ti (s)	xi	ti (s)	xi	ti (s)	xi
Measures...	ti (s)	xi	ti (s)	xi	ti (s)	xi	ti (s)	xi	ti (s)	xi	ti (s)	xi	ti (s)	xi
Measures...	ti (s)	xi	ti (s)	xi	ti (s)	xi	ti (s)	xi	ti (s)	xi	ti (s)	xi	ti (s)	xi
Measures...	ti (s)	xi	ti (s)	xi	ti (s)	xi	ti (s)	xi	ti (s)	xi	ti (s)	xi	ti (s)	xi
Measures...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

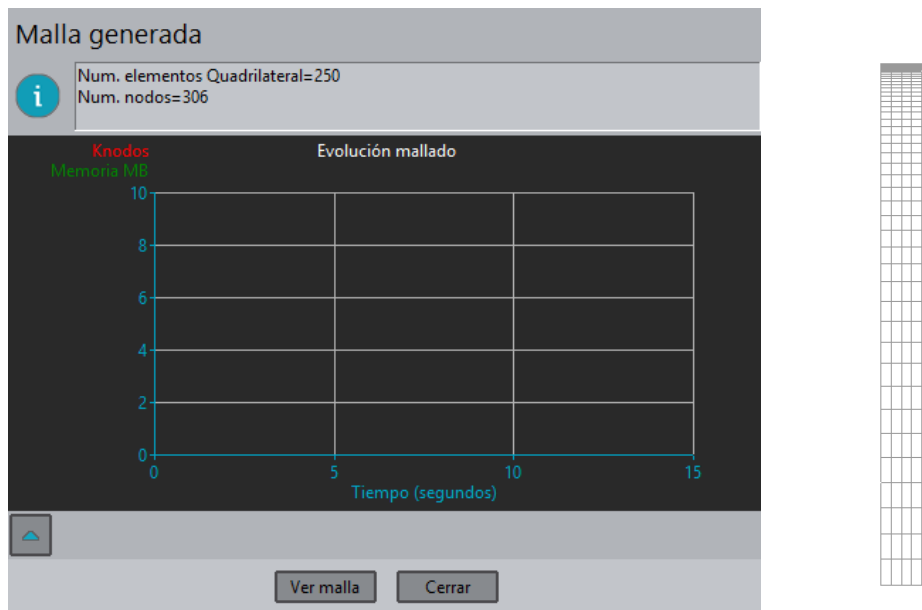
**Figura 24.** Esquema del formato del archivo de data atmosférica. (Departament d'Enginyeria del Terreny, 2017)

### 3.7 Preprocesamiento

En este tipo de modelo donde las condiciones atmosféricas son unos de los parámetros más importantes y los cuales los componentes varían en la línea de tiempo de estudio, se definen primero un intervalo de estudio en equilibrio, en el cual se establezcan todas las invariables. Un segundo intervalo de tiempo copia todas las condiciones del material e incorpora el análisis atmosférico del modelo (Figura 25).

**Figura 25.** Esquema de los intervalos de tiempo.

Por último, la generación de la malla de la superficie se describe por medio de elementos cuadriláteros con un refinamiento en la parte superior donde las cargas atmosféricas son condicionantes, lo cual resulta en la Figura 26.



**Figura 26.** Esquema de la malla de la columna unidimensional.

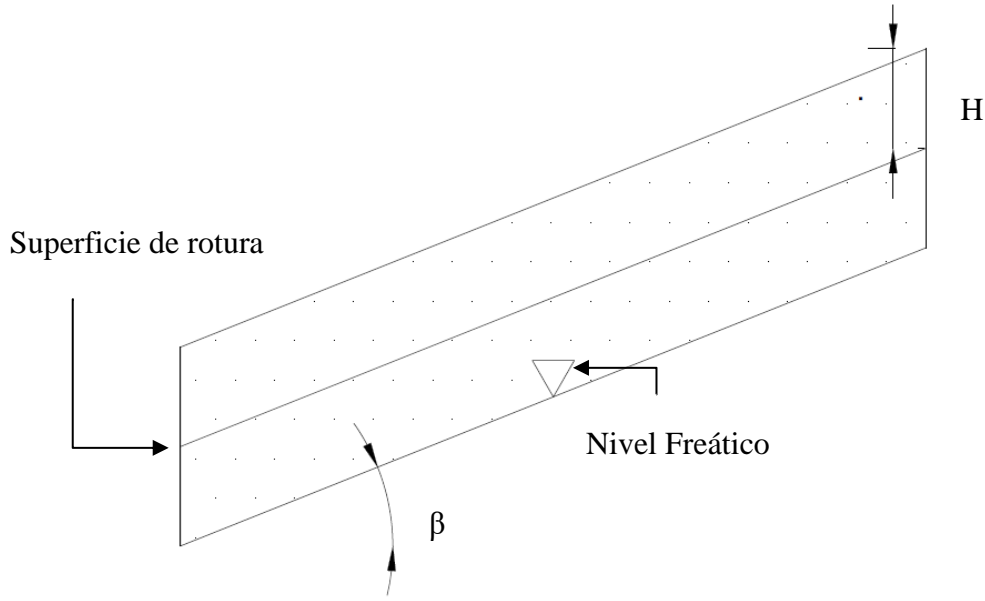
### 3.8 Factor de Seguridad

La aplicación de un modelo de talud infinito para el análisis de factores de seguridad nos permite efectuar un análisis de estabilidad mediante los resultados del post-procesamiento del modelo numérico desarrollado en Code Bright, al considerar los efectos de procesos atmosféricos. Este se obtiene al calibrar las ecuaciones constitutivas del medio, las condiciones iniciales, parámetros del material y los elementos atmosféricos.

Diferentes estudios se han enfocado en analizar la influencia de los elementos desencadenantes de los deslizamientos al estudiar los factores que componen el factor de seguridad. En el cual se enfocan en los parámetros no saturados siendo las presiones intersticiales y las precipitaciones los elementos condicionantes de los elementos hidrogeológicos.

La intensidad de la precipitación es uno de los principales catalizadores de los deslizamientos en laderas, pero otros condicionantes deben tomarse en cuenta para obtener una imagen mucho más incluyente de los factores que intervienen en estos desastres. Siendo la Homogeneidad o heterogeneidad de las capas que constituyen el suelo, la existencia de grietas verticales abiertas, las características del suelo con relación a permeabilidad y retención de agua y la geometría de la ladera, otros factores a considerar en este tipo de estudios.

En análisis de los factores locales de seguridad los ejecutan a través de las ecuaciones de talud infinito como se ilustra en la Figura 27. Donde  $H$  es la profundidad,  $\gamma$  peso específico,  $\beta$  la inclinación del talud.



**Figura 27.** Esquema de análisis por talud infinito.

Este modelo se modifica para la zona no saturada para incluir los efectos de la succión en la propiedad de resistencia del talud, y la obtención de los valores absolutos de esta, al encontrar la diferencia al parámetro de presión de gas del modelo. Por último, el valor del ángulo de fricción se modifica a través del valor de la saturación efectiva.

$$\tau = c' + \sigma \tan \varphi + s \tan \varphi_b \quad (24)$$

$$\tau = c' + \sigma \tan \varphi + (u_a - u_w) \tan \varphi_b$$

$$F = \frac{c}{\gamma H \cos \beta \sin \beta} + \frac{\tan \varphi}{\tan \beta} + \frac{(u_a - u_w) S_r \tan \varphi}{\gamma H \cos \beta \sin \beta} \quad (25)$$

$$S_r = \frac{S_l - S_{rl}}{S_{ls} - S_{rl}} \quad (26)$$

La evaluación del factor global de seguridad se calcula para tres tipos diferentes de suelo y su evolución para las condiciones atmosféricas. La evolución de las presiones en la zona de estudio y un modelo de material de resistencia homogénea resulta en valores de factores de seguridad a lo largo de la profundidad del modelo. Otros cálculos representan condiciones de resistencia heterogénea para las capas superficiales.

En base a la ecuación de Factor de seguridad descrita y los valores obtenidos en el post-procesamiento del modelo para presiones líquidas y saturación, y los parámetros mecánicos del material obtenemos la evolución de los eventos de rotura para la zona de falla de la columna.

**Tabla 10.** Parámetros mecánicos e hidráulicos de análisis del factor de seguridad

	Arcilla	Limo	Arena
<b>Sls</b>	1	1	1
<b>Srl</b>	0.3	0.2	0.02
<b>c (kN/m<sup>2</sup>)</b>	4	0	0
<b><math>\gamma</math> (kN/m<sup>3</sup>)</b>	20	20	20
<b><math>\phi</math></b>	25	25	35
<b><math>\beta</math></b>	45	45	45

## 4 Resultados

### 4.1 Correlación Spain02 – Modelo SMHI

Estos índices primero son promediados por su peso de influencia del área en el punto de estudio regional. Y la medida de correlación se obtiene por medio del valor del error medio cuadrático normalizado (Normalized Mean Squared Error, NSME), el cual permite estimar las desviaciones entre valores medidos (M) u observacionales, y los valores de las predicciones (P).

$$NMSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \frac{(P_i - M_i)^2}{\bar{P}\bar{M}} \quad (27)$$

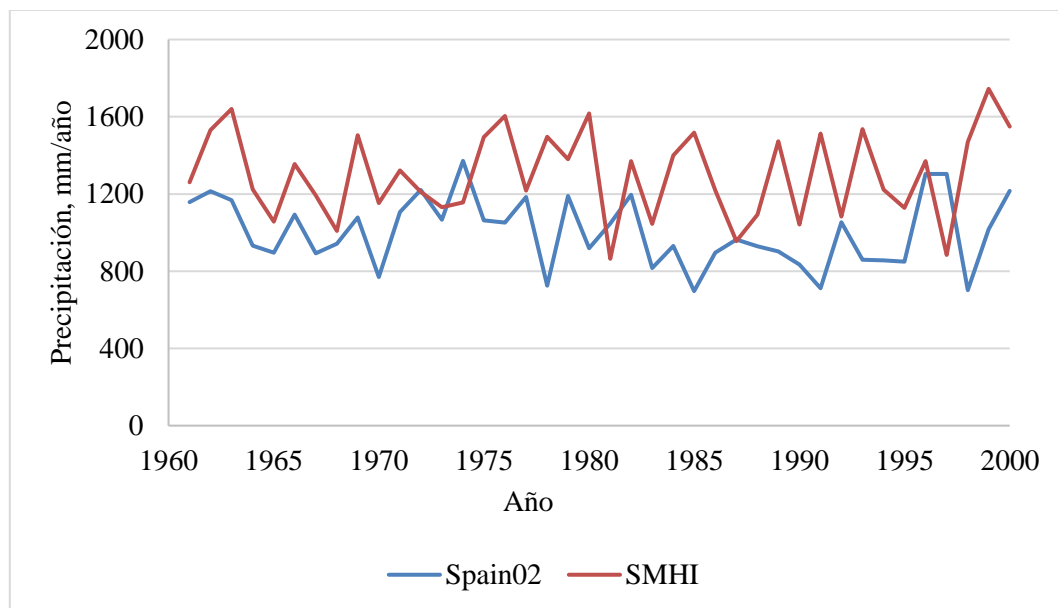
Este indicador permite evaluar las diferencias más sobresalientes entre los modelos evaluados al tomar los valores absolutos. Las tendencias más cercanas o iguales a cero describen a un modelo con aproximaciones esperadas en el espacio y tiempo.

Los índices obtienen valores como se describe a continuación:

**Tabla 11.** Correlación NMSE de los índices Spain02 y SMHI

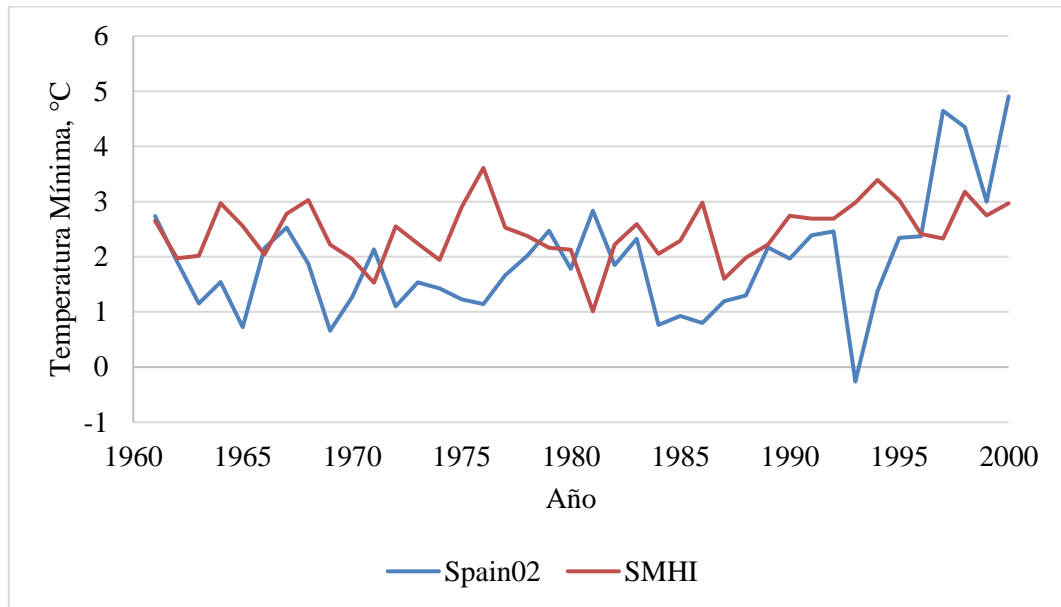
	PRCPTOT	TMin	TMax
NMSE	0.13	0.33	0.01

Siendo estos valores una buena indicación de la relación entre los valores observacionales de la matriz Spain02 y el modelo predictivo del SMHI, cada uno con valores muy por debajo del rango medio de aceptación de 1.5 (Patryl y Galeriu, 2011).

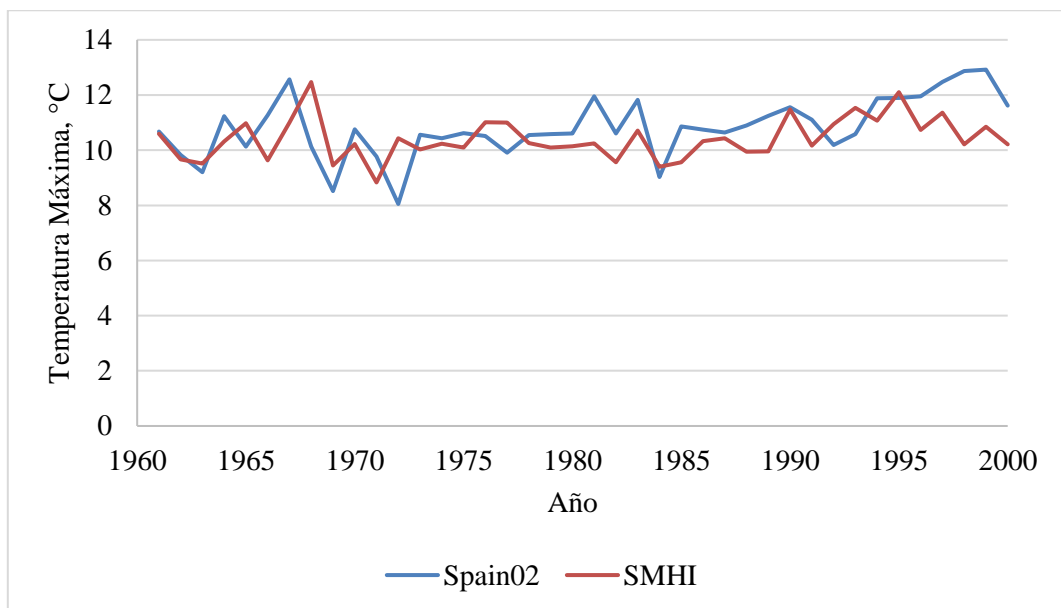


**Figura 28.** Índices PRCPTOT para Spain02 y SMHI

Las tendencias generales observadas para los datos observacionales indican escalas regionales diferentes para los diferentes métodos: con mayores valores para estaciones meteorológicas y puntos medios para los modelos predictivos. Siendo los valores de precipitación un parámetro de correlación con menor aproximación dentro de los modelos globales, debido a la complejidad de los ciclos hídricos. Mientras que las temperaturas máximas recopiladas pueden estimarse en mejor medida a través del espectro de estudios y van a depender directamente del escenario de emisiones.



**Figura 29.** Índices TMin para Spain02 y SMHI

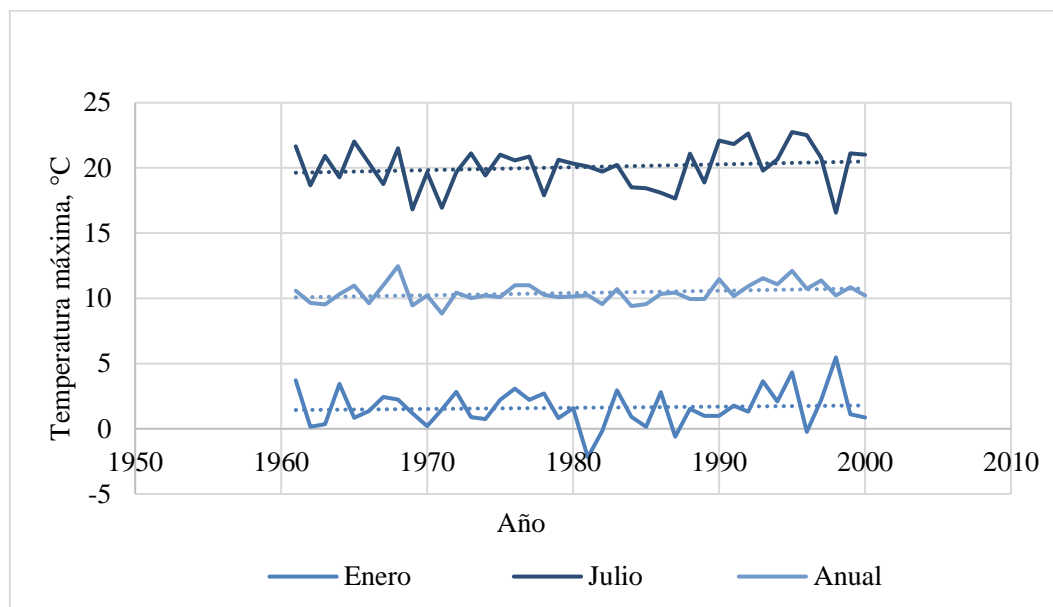


**Figura 30.** Índice TMax para Spain02 y SMHI

## 4.2 Proyección de cambio climático – Modelo SMHI

### 4.2.1 Temperatura máxima

Los valores de temperatura máxima se estiman como los valores promedios mensuales de los puntos máximos diarios, y de ellos el promedio anual de tendencias a lo largo de la línea de tiempo del estudio. En general las estimaciones de cambio para este parámetro repercuten a niveles sociales y económicos, a través de los riesgos de aumento de olas de calor y su influencia en la agricultura local.



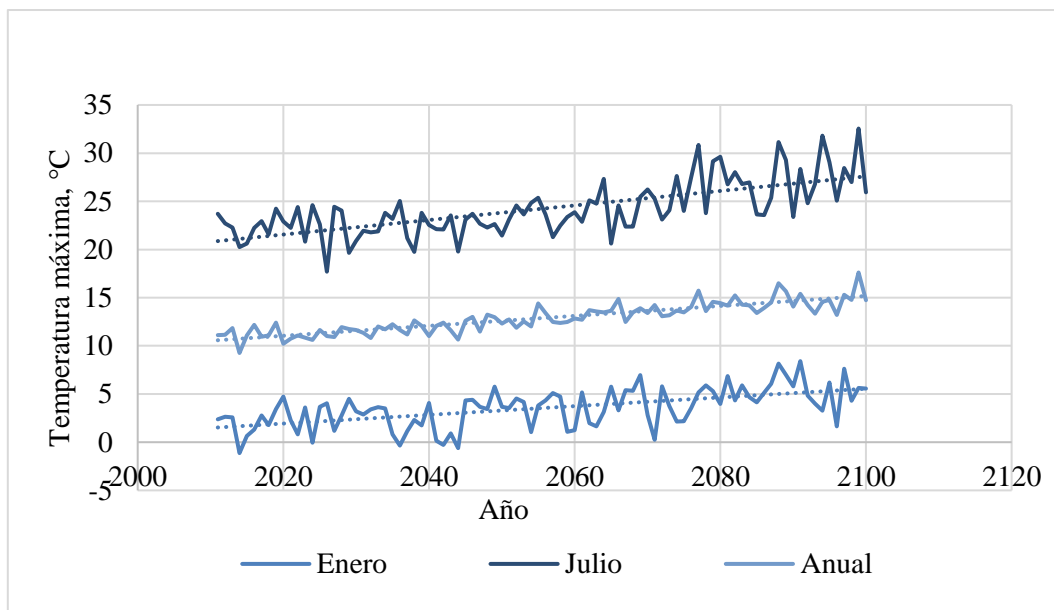
**Figura 31.** Tendencias de temperatura máxima 1961-2000

En la Figura 31, para el período histórico de 1961-2000, las tendencias de la temporada de invierno (enero) expresa un crecimiento lineal del 0.89%, mientras que la evolución de la temporada de verano (julio) muestra un 2.21% de tendencia de evolución, que en total determina un 1.75% para los promedios anuales. Valores de cambio que se mantienen en un ciclo casi constante de cambio para las 4 décadas de análisis.

Al comparar estos valores con el siguiente período del 2011-2100 descritos en la Figura 32, las tendencias crecen significativamente en un 7.54% para el verano, 4.52% para el invierno y 5.16% en promedios anuales. Donde se aprecia como estos llegan a superar los umbrales de temperatura máxima de periodos previos: 25°C para el verano y 5°C para el invierno. Esto al estudiar el caso de emisiones particulares para el modelo AIB, siendo el punto medio de estimaciones de cambio.

Siendo estos valores los puntos de riesgo en el incremento de sequías y otro tipo de fenómenos atmosféricos. Los años entre el 2020 y 2060 el período de proyecciones de cambio más cercano a las estimaciones de los informes del IPCC, con un aumento de 5°C. A su vez los primeros años de este modelo muestran los índices de temperaturas mínimas más elevados, lo cual disminuye el umbral de influencia de calor sobre la zona.

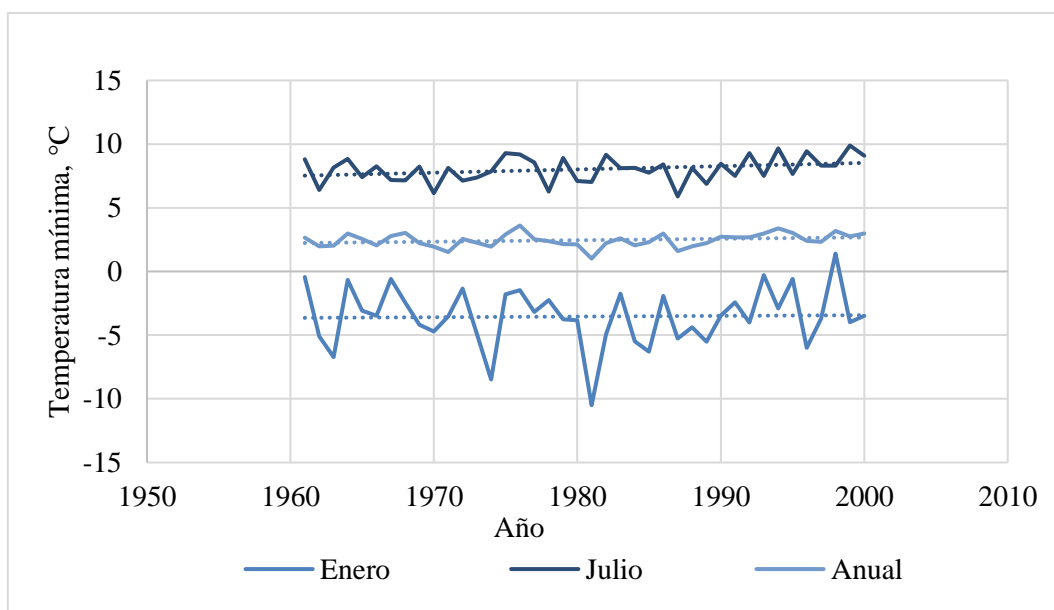




**Figura 32.** Tendencias de temperatura máxima 2011-2100

#### 4.2.2 Temperatura mínima

Las temperaturas mínimas diarias para el período 1961-2000 presentan una evolución similar a las temperaturas máximas, con valores de crecimiento de 2.56% para el verano, 0.53% para el invierno y de 1.14% de promedios anuales, como se ilustra en la Figura 18.



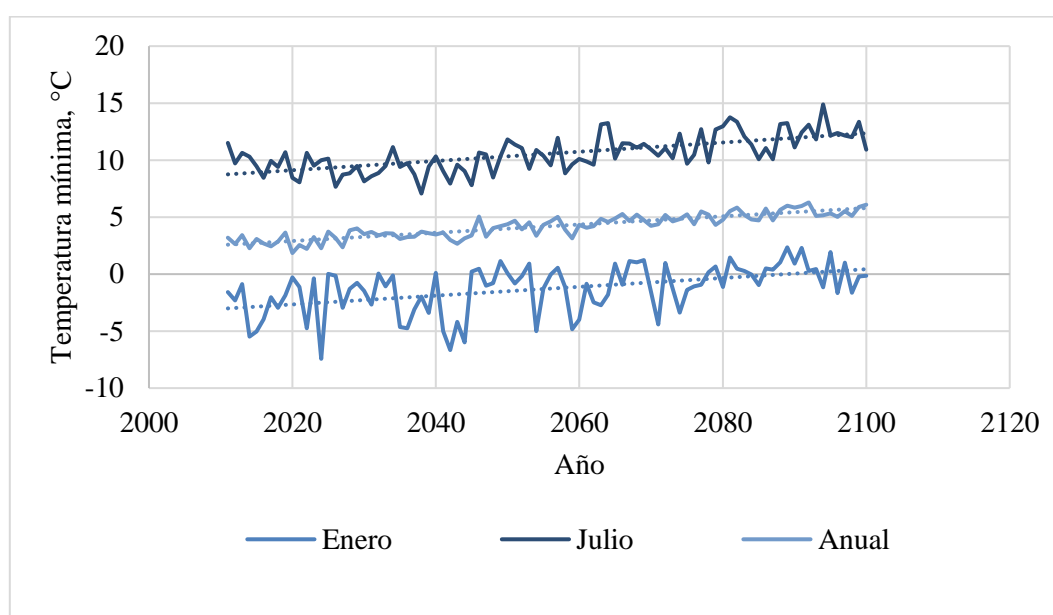
**Figura 33.** Tendencias de temperatura mínima 1961-2000

En cambio, en los procesos de periodo 2011-2100, las tendencias de los valores mínimos también presentan crecimiento, pero no en la misma escala de su contraparte en las temperaturas máximas. Con 4.05% para el verano, 3.87% para el invierno y 3.61% para los promedios anuales. Este factor también es visible en el índice DTR con una evolución

del primer periodo de 0.6% a un segundo periodo de 1.5%. Y al igual que las Tmax llegan a sobrepasar los umbrales máximos previos de 10°C y 0°C.

Los años del 2011-2040 siendo la primera sección del modelo predictivo a futuro muestra una escala similar de temperaturas mínimas para la temporada de invierno que su predecesor en el temporal histórico, lo cual disminuye las afectaciones por intervención calórica en la columna de suelo. Este se convierte en un parámetro a considerar al evaluar el modelo termo hidráulico para las diferentes tipologías.

Otros índices importantes para destacar en materia de temperatura que permiten describir estos procesos (Temperatura máxima diaria mínima, Temperatura mínima diaria mínima, Temperatura mínima diaria en el percentil 10, Temperatura máxima diaria en el percentil 10, Temperatura mínima diaria en el percentil 90, Temperatura máxima diaria en el percentil 90) se detallan en la sección de Anexos.



**Figura 34.** Tendencias de temperatura mínima 2011-2100

#### 4.2.3 WSDI - Duración de las olas de calor

El índice de duración de las olas de calor estima los días dentro de ciclos consecutivos mayores a 6 días en los cuales la temperatura máxima alcanza valores por encima del percentil 90 de la estadística anual.

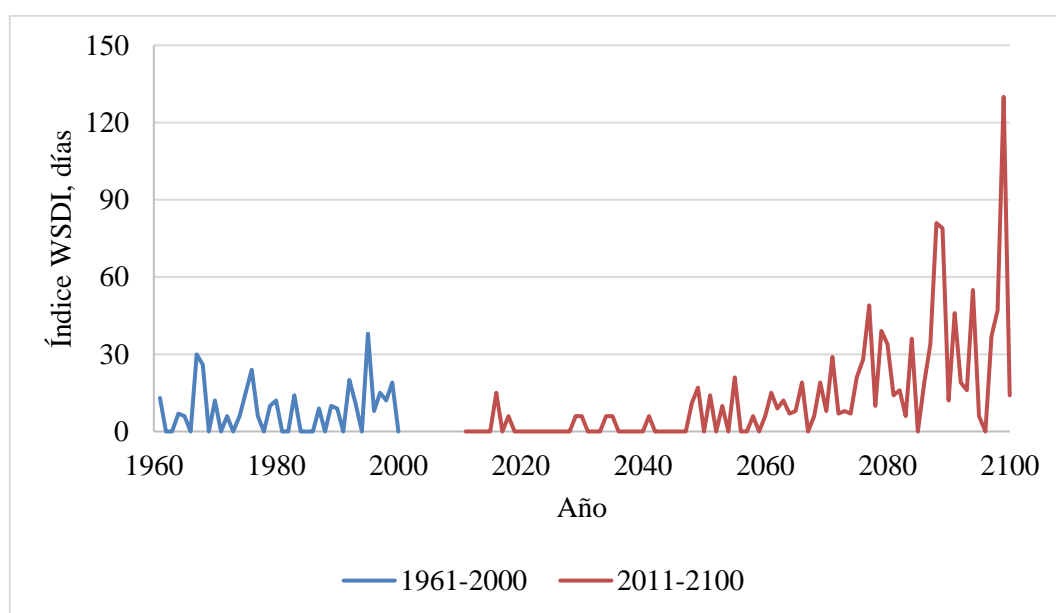
En la Figura 35 se comparan en secuencia la evolución de los dos periodos de estudio, y se ilustra un claro cambio, con un estado casi continuo de presencia a partir del 2049 y llega a alcanzar valor por encima de los estimados para el siglo pasado desde el 2077. Mientras que las tendencias del 2011-2040 permanecen por debajo del precedente histórico.

Filho et al. (2019) evalúa el estado general de Europa donde la revisión del índice WSDI muestra un incremento importante a través del siglo XXI, encontrando referencias observadas para los años 2003, 2007, 2012 y 2015. Estos cambios se consideran

significativos al considerar su influencia en los estados de demanda de energía, condiciones de salud y las repercusiones socioeconómicas.

El tratamiento de estos índices varía sustancialmente dependiendo de sus ecuaciones de origen, al dividirse en valores totales, de percentiles o en base a duraciones de eventos. Siendo este último el indicador principal de frecuencia para los períodos de retorno de la evolución del estado atmosférico.

Bajo esta descripción Dosio (2016) analiza los datos del proyecto EURO-CORDEX y las definiciones del ETCC para índices de cambio, para entender cómo afectan las escalas regionales a los valores en general de la señal de estudio. En el cual interpretan una baja interferencia de la reducción de escala en los eventos extremos como es el caso del WSDI, y de los cuales los cambios se pueden esperar para la variabilidad entre modelos.



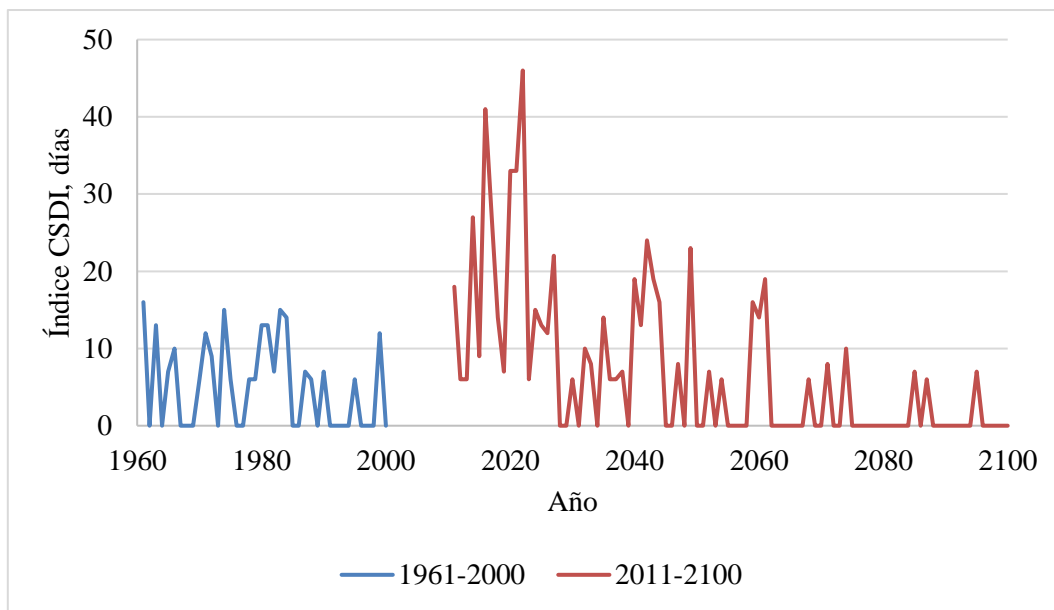
**Figura 35.** Índice WSDI (Duración de las olas de calor)

#### 4.2.4 CSDI - Duración de fríos extremos

La contraparte del índice WSDI es el CSDI donde se buscan períodos por encima de los 6 días donde las temperaturas se encuentren bajo el percentil 10 de las TN. Siendo un índice de frecuencia para eventos extremos en el temporal atmosférico al evaluar colas de la función de distribución de probabilidad.

Y la respuesta es opuesta a del WSDI donde existe una presencia estable de valores mínimos de temperatura en las primeras décadas y que tiende a disminuir en cuanto los valores del DTR empiecen a ascender hacia el 2100.

Estos valores muestran tendencias similares a los del modelo para temperaturas mínimas promedios anuales, donde la década del 2011-2040 vincula valores absolutos de temperaturas mínimas elevadas (Figura 36).

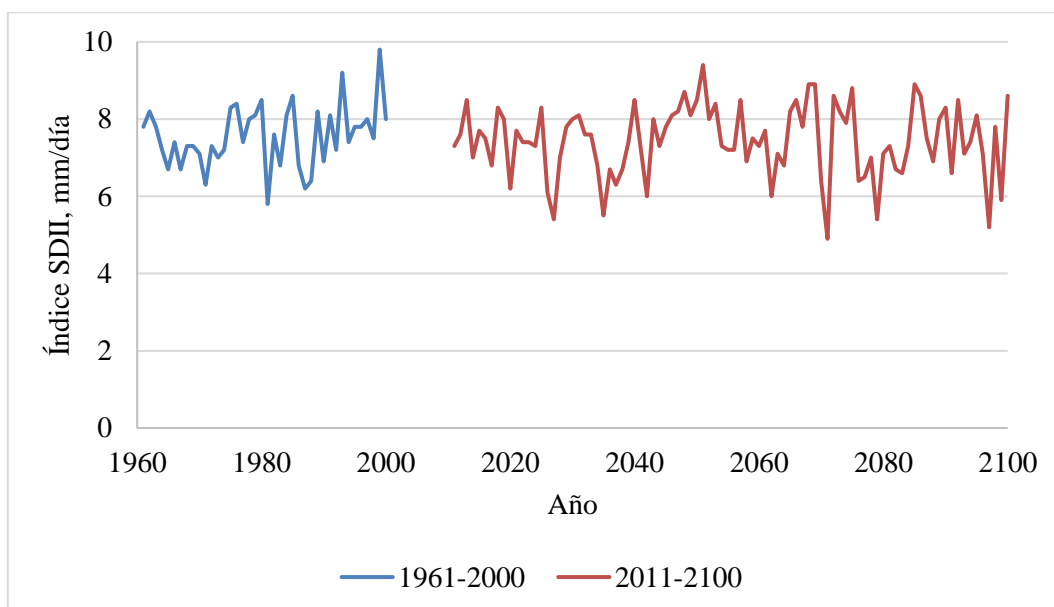


**Figura 36.** Índice CSDI (Duración de fríos extremos)

#### 4.2.5 SDII - Intensidad de precipitación anual

Al considerar los indicadores de cambio de los ciclos hídricos en base a consideraciones de cambio climático se pueden apuntar el SDII, PRCPTOT, CDD, CWD y Rx5 como los valores de mayor referencia al estudiar cambios en frecuencia e intensidad.

El índice de intensidad de precipitación simple (Figura 37) se obtiene al evaluar los valores acumulados de mm de precipitación en un periodo mensual o anual y determinar los días húmedos ( $RR > 1\text{ mm}$ ).



**Figura 37.** Índice SDII (Intensidad de precipitación anual)

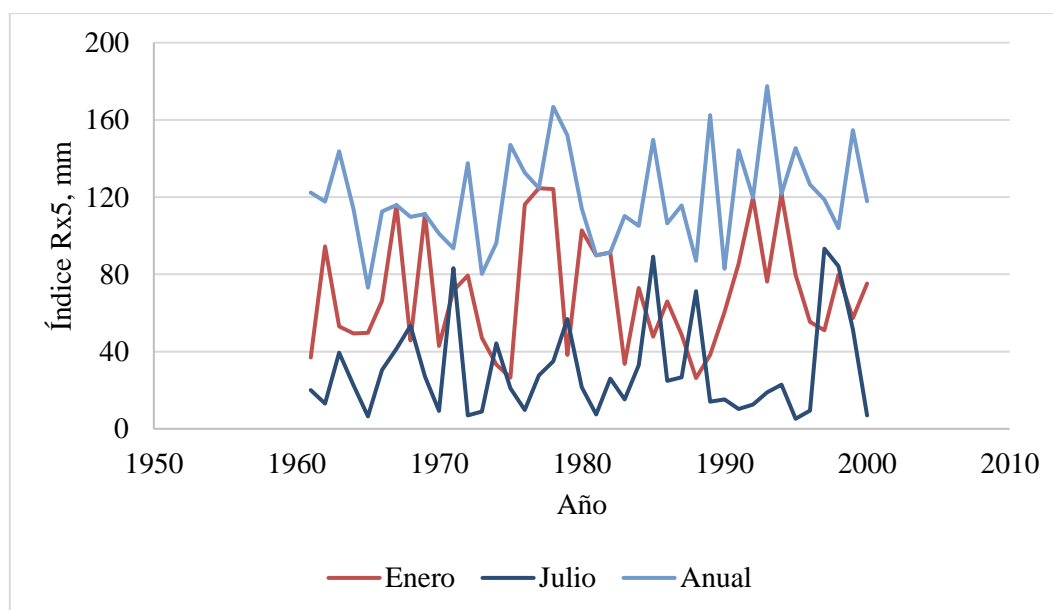
Y en relación con los cambios de temperatura, este nos permite evaluar la presencia de eventos extremos de lluvia en el periodo, ya que al preverse una declinación del valor de precipitación total anual y este índice mantenga valores de fluctuación constante indica un incremento de lluvias de mayor intensidad y temporalmente más concentradas y en reducción a nivel de la zona espacial afectada; pero sin cambiar el número de eventos anuales, lo cual es un factor desencadenante importante dentro de los estudios de estabilidad de laderas.

Esta disminución en la cantidad de días húmedos o de lluvia es un factor de correlación importante. En los trabajos de Giorgi et al. (2011, 2019) este índice en relación con el WSDI son evaluados como indicadores de la respuesta hídrica a el calentamiento global, dando origen a nuevos puntos de estimación.

#### 4.2.6 Rx5day - Precipitación consecutiva de 5 días

El índice de precipitación mensual máxima consecutiva de 5 días determina los valores en milímetros de los eventos de lluvias que entren dentro de este parámetro. Lo cual indica un proceso de acumulación de presiones de agua importantes dentro del talud, que pueden apuntar a procesos de inestabilización.

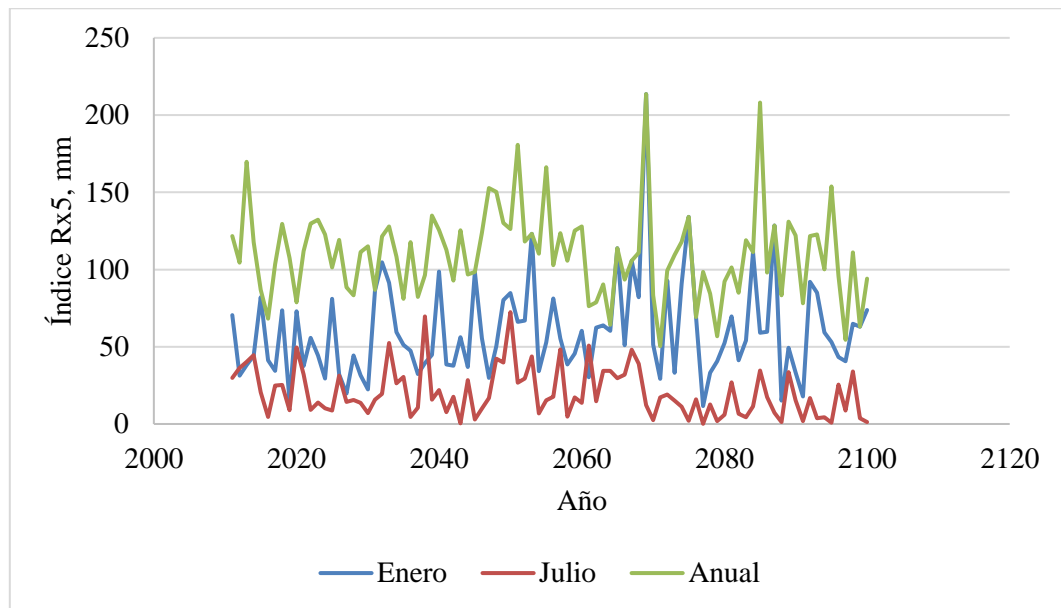
En el período de 1961-2000 (Figura 38), especialmente para los eventos en temporadas de verano que alcancen valores similares a los anuales (1971, 1988, 1997) son más sensibles a indicar cambios importantes para épocas secas donde el agrietamiento del suelo permite el aumento exponencial de las presiones para eventos de lluvia extremos.



**Figura 38.** Índice Rx5 (precipitación consecutiva de 5 días) 1961-2000

En el periodo 2011-2100 (Figura 39) los eventos de la temporada de verano disminuyen en la serie temporal y el invierno permanece representativo de los eventos de lluvia extremos donde el 2069 y 2085 marcan valores mayores a las primeras décadas de estudio. A su vez, la intensidad de los eventos mensuales de mayor intensidad anuales también va en descenso, en menor medida a los porcentajes de precipitación anuales, lo cual también es un indicador de lluvias extremas.

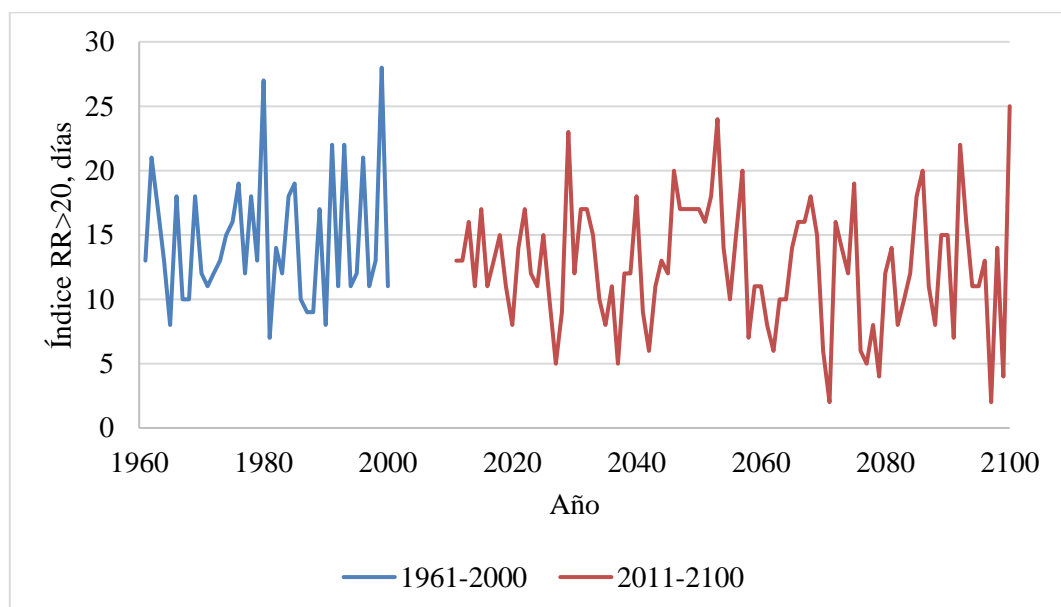
A su vez los valores en milímetros acumulados para los eventos anuales presentan promedios menores a los del periodo 1961-2000. Entre límites de 10 a 30 mm, en consistencia con la disminución de la precipitación total anual.



**Figura 39.** Índice Rx5 (precipitación consecutiva de 5 días) 2011-2100

#### 4.2.7 RR > 20 mm - Eventos extremos de lluvia por encima de 20 mm

El RR > 20 es el indicador de días con precipitaciones mayores a 20 mm. Los cuales pueden indicar eventos críticos para análisis de 24 horas, estos vinculados a las acumulaciones previas de presiones debido a registros de días húmedos menos intensos.



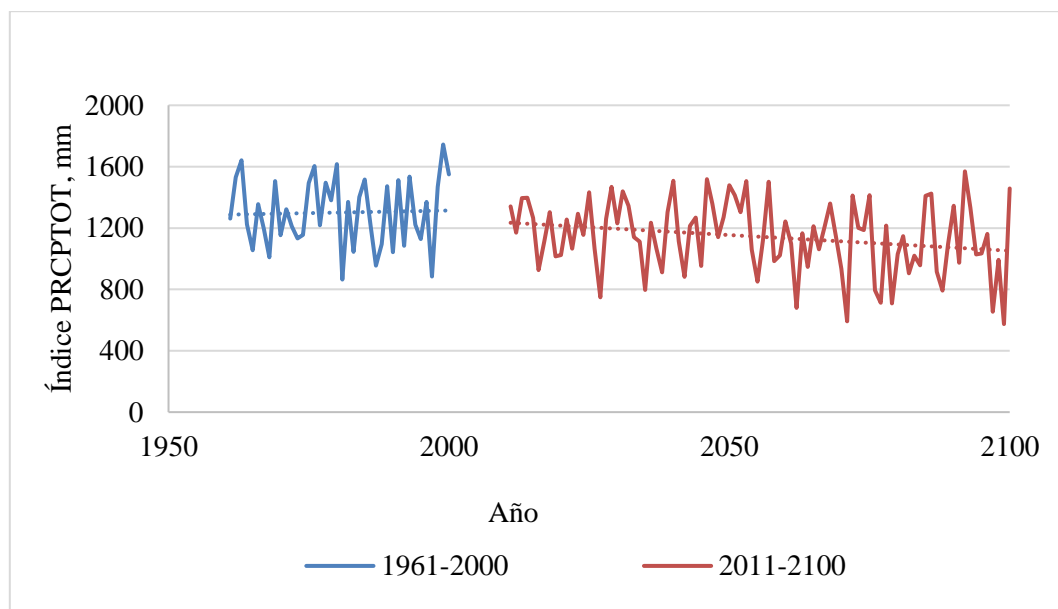
**Figura 40.** Índice RR > 20mm (eventos extremos de lluvia por encima de 20 mm)

Para la Figura 40, en el rango de 1961-2000 los valores varían entre un mínimo de 7 días y un máximo de 28 días, y un promedio de 14 días para los 40 años. Al evaluar el segundo periodo de 2011-2100, los mínimos disminuyen a 2 días, a un máximo de 25 días y promedio de 12 días, describiendo una pendiente de pérdida del 1.26%

Al considerar los años con eventos extremos en promedio para ambos períodos, estos días se mantienen en un número igual o mayor al precedente, lo cual mantiene el postulado del cambio del ciclo de lluvias a eventos más concentrados y extremos para un espacial más reducido, pero manteniendo el número de eventos en el ciclo.

#### 4.2.8 Precipitación anual

En cuanto a la acumulación de mm de lluvia anuales, las predicciones generales dentro del contexto regional conducen a disminuciones en los eventos de lluvia especialmente en las temporadas de invierno con mayor impacto de las precipitaciones extremas. Este factor interviene en el descenso de las corrientes de ríos, el incremento de sequías y la demanda de agua.



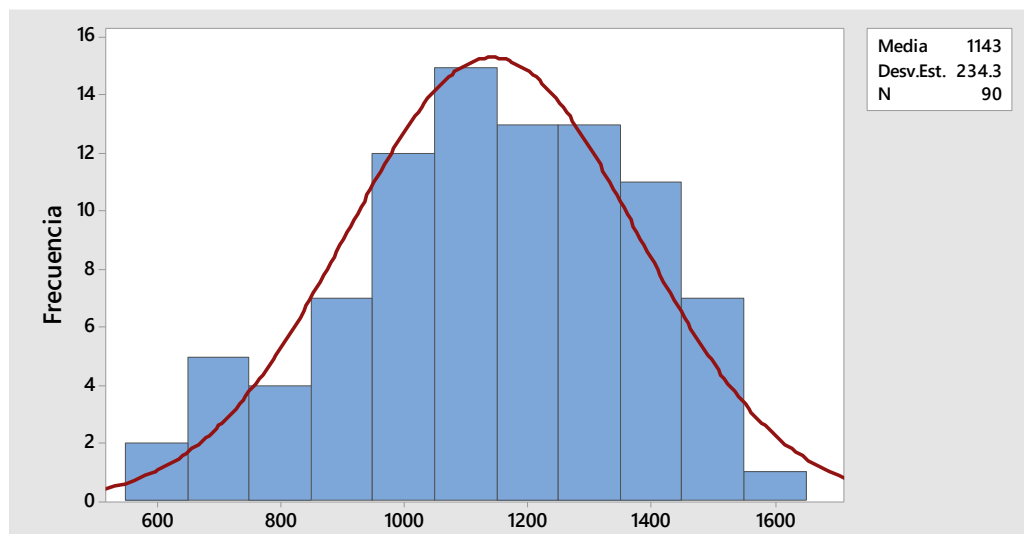
**Figura 41.** Índice PRCPTOT (precipitación total anual, mm)

El modelo actual prevé una pérdida promedio de 200 mm de lluvia para el período 2011-2100 en comparación con las 4 décadas previas donde la evolución de las lluvias se encontraba en un estado estable (Figura 41).

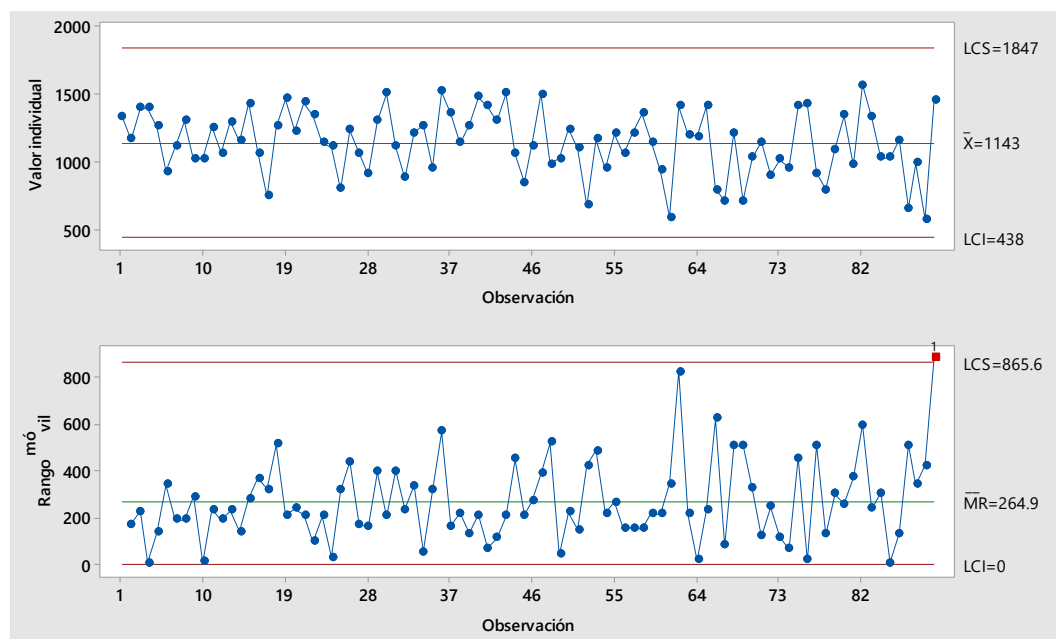
Al comparar los histogramas de frecuencias (Figura 42) para los que se identifica un aumento en los límites de acumulación de lluvia, cambiando los percentiles de probabilidad. Especialmente para años cálidos, consistentes con las tendencias de calentamiento.

La data continua de observaciones individuales (Figura 43) se analiza a través de gráficos de control para detectar inestabilidades, de lo cual obtenemos como resultado del rango móvil de desviaciones estándar un incremento en la variabilidad en el rango del 2011-2100, que indica una mayor tasa de cambio y probabilidad de obtener percentiles menores

al 10% (años cálidos) y mayores al 90% (años húmedos) consecutivos en la línea temporal.



**Figura 42.** Histograma de precipitaciones anuales 2011-2100



**Figura 43.** Gráfica de control individual de rango móvil de precipitaciones 2011-2100

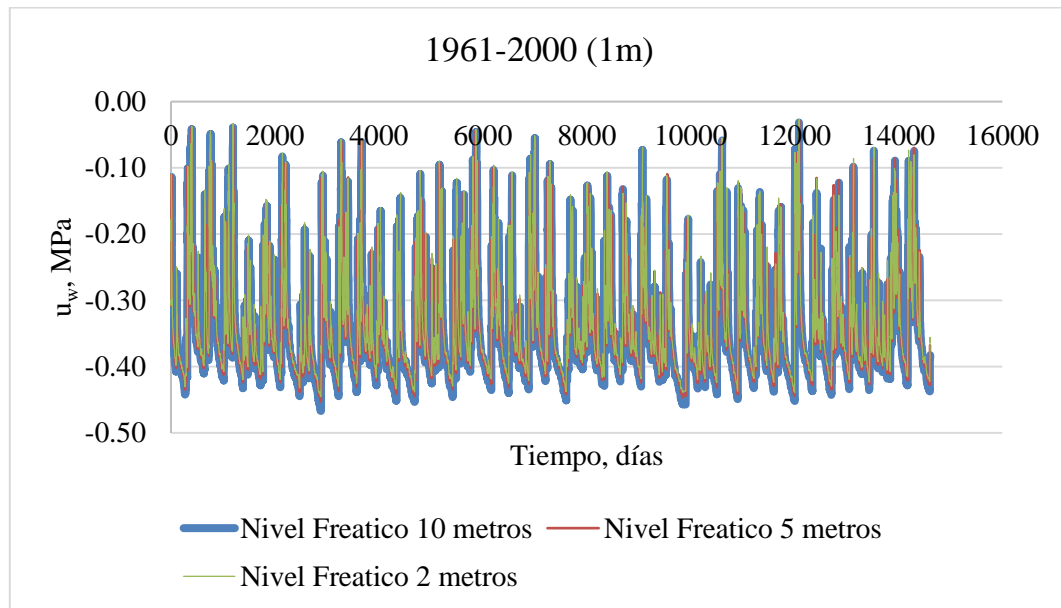
### 4.3 Modelos termo-hidráulicos

La etapa de post-procesamiento permite la evaluación de los parámetros variables en la línea de tiempo de estudio, los cuales se pueden visualizar a través de los gráficos o diagramas de relleno de contorno desde los puntos de equilibrio iniciales a los estados críticos por evaluar. Los parámetros por considerar están relacionados con la evolución de las presiones intersticiales y los niveles de saturación; al ser considerados elementos importantes en las tareas de análisis de la estabilidad.

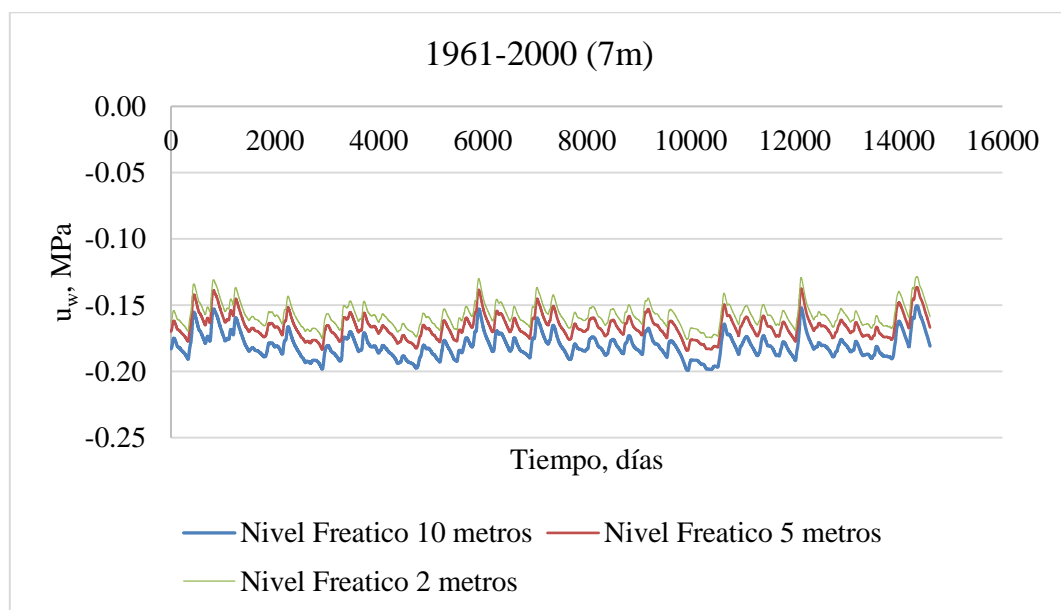


Estos se comparan tanto para los diferentes puntos de tiempo como para diferentes profundidades de afectación de los parámetros meteorológicos, donde las afectaciones por infiltración responden a eventos extremos de precipitación.

Se pueden observar como las fluctuaciones en los valores obtenidos para los parámetros de saturación y temperatura sufren mayores cambios en su comportamiento para las capas más superficiales del suelo en contacto con los procesos climáticos, mientras que los estados de las capas más profundas conservan en su mayoría los valores del estado de equilibrio.



**Figura 44.** Evolución de las presiones líquidas en la zona no saturada para diferentes niveles freáticos



**Figura 45.** Evolución de las presiones líquidas por debajo del nivel freático

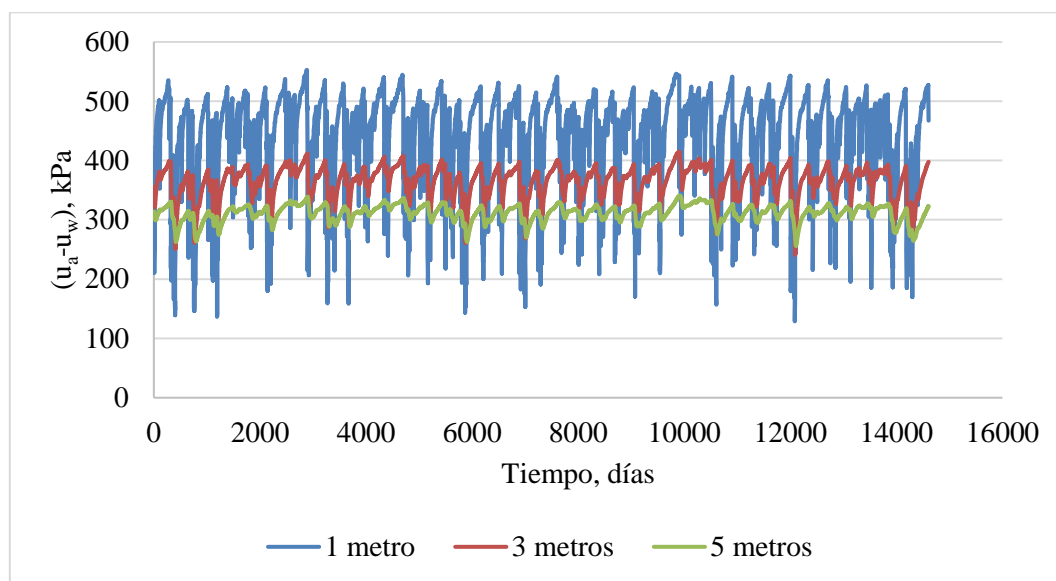
A su vez, el estado inicial del modelo es un factor importante al considerar la evolución de las presiones intersticiales a lo largo de la columna de suelo en análisis. Siendo la condición de contorno para los procesos de flujo en la base y el nivel freático de afectación inicial.

Por lo cual se evalúan las reacciones a diferentes casos, en las siguientes gráficas se presentan las presiones líquidas para zonas no saturadas (Figura 44) donde los valores permanecen constantes a lo largo de los modelos. Y para la zona afectada por el nivel freático (Figura 45) las variaciones entre los modelos más alejados permanecen en un rango de 0.025 MPa.

#### 4.3.1 Arcilla

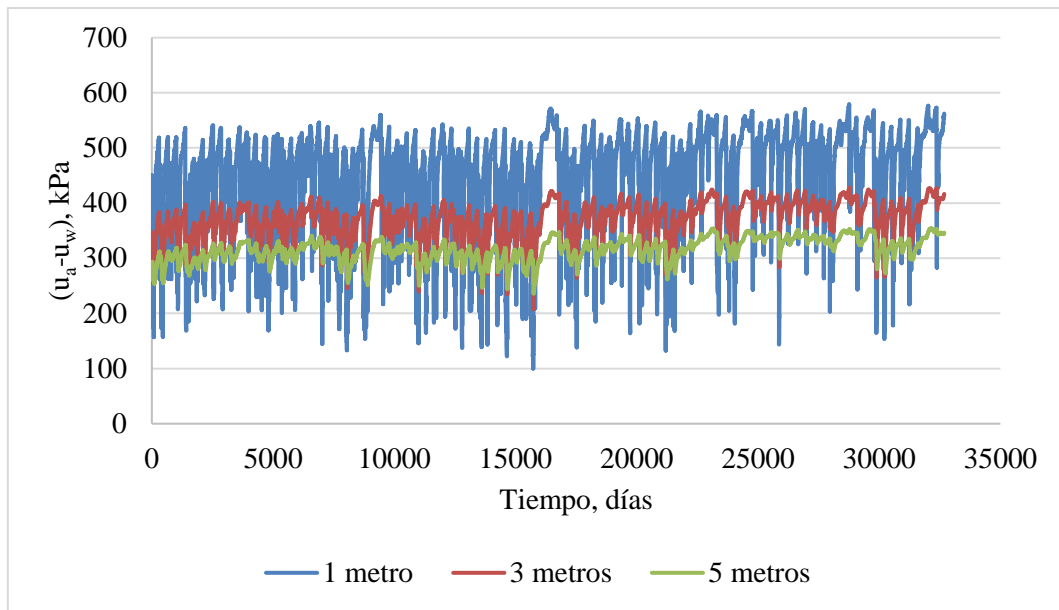
El modelo para los parámetros de la arcilla está constituido por una columna de 50 metros de altura con una condición de contorno de salida de masa, un nivel freático a 5 metros por debajo de la superficie y los datos atmosféricos contienen 5 años previos de data de calibración para ambos periodos de análisis. Esto permite que las presiones líquidas y los procesos de transferencia, tanto como la acción climática encuentren el punto real de estado en referencia a la condición inicial establecida.

Debido a las condiciones mecánicas e hidráulicas, y con relación a la respuesta de las otras tipologías de suelos, se establece este estado inicial como el modelo de mejor respuesta conceptual para la evaluación de estabilidad.



**Figura 46.** Succión a diferentes profundidades de la columna de arcilla (1961-2000)

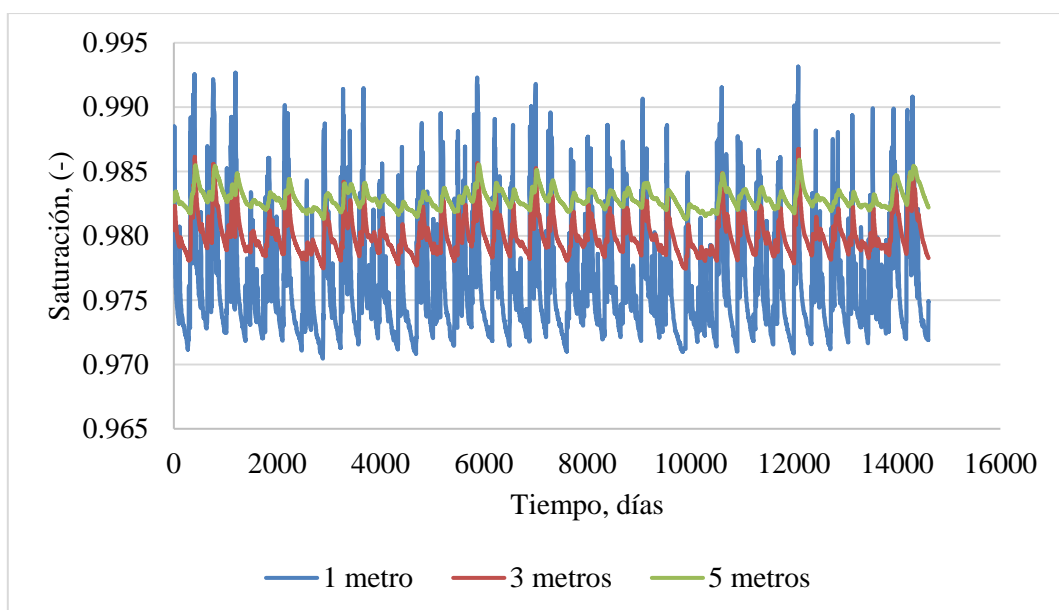
En las Figuras 46 y 47 se ilustran los cambios de succión y las Figuras 48 y 49, del grado de saturación para los periodos de análisis para la zona no saturada inicial de la columna modelo. Estos reflejan el efecto de la data atmosférica en el desarrollo de los valores de succión y la disminución de este rango a mayores profundidades. Hasta un metro por debajo de la superficie la evolución de estos valores de presiones líquidas encuentra sus valores máximos, para los años entre 1961-2000, obtiene succiones entre 150 y 525 kPa con una tendencia de cambio constante a lo largo del eje de tiempo.



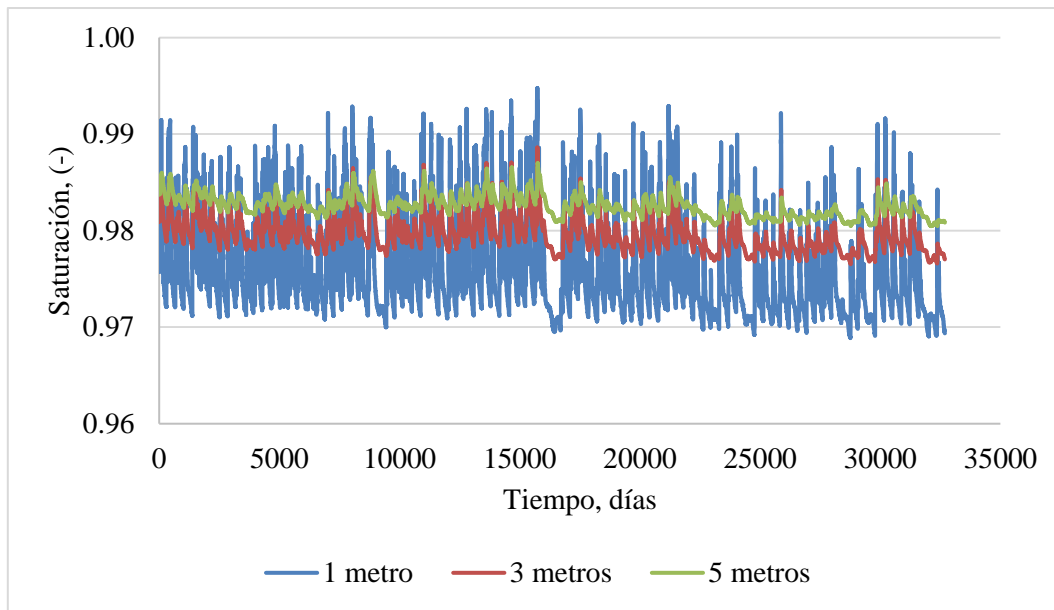
**Figura 47.** Succión a diferentes profundidades de la columna de arcilla (2011-2100)

Mientras que el periodo del 2011-2100, estos valores alcanzan mínimos y máximos por encima del análisis anterior, entre 100 y 600 kPa con una tendencia lineal de cambio positivo en la línea del tiempo, que es más constante con los cambios de temperatura predictivos del modelo.

Esto indica conexiones con los parámetros de precipitación y la intervención de los cambios de temperatura en la formación de los valores de succión. Siendo la radiación y la evapotranspiración elementos importantes en la transferencia de líquidos y gases a través de la micro y macroestructura de la arcilla.



**Figura 48.** Grado de saturación a diferentes profundidades de la columna de arcilla (1961-2000)



**Figura 49.** Grado de saturación a diferentes profundidades de la columna de arcilla (2011-2100)

El modelo a su vez es evaluado para pasos temporales diarios, lo que permite un control directo de los valores absolutos indicadores de rotura y sus relaciones con los fenómenos atmosféricos para los 130 años de estudio.

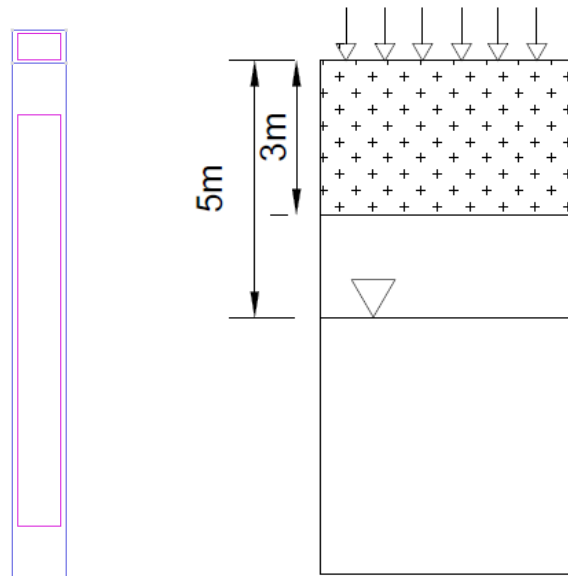
Estos cambios en los patrones de flujo también se ven reflejados en los valores de succión para la columna de arcilla, siendo el diferencial de mínimos y máximos del segundo periodo de análisis más amplio que su predecesor.

Siendo la temperatura y radiación los catalizadores de la respuesta de difusión y transferencia, que a su vez y debido a las capacidades hidráulicas del material no llegan, más que en casos de eventos extremos, a la saturación completa de la columna. Lo cual es un factor determinante para roturas, y su relación de proporcionalidad a través de los efectos de la saturación efectiva.

#### 4.3.2 Limo

El modelo para los parámetros del limo y posteriormente la arena siguen condiciones similares a la arcilla al estar constituidos por una columna de 50 metros de altura, las condiciones de contorno y nivel freático inicial, pero los datos atmosféricos contienen 20 años previos de data de calibración para ambos periodos de análisis. Debido a la necesidad de estabilización de estos materiales y la obtención de data representativa del estado real de la columna.

A su vez un segundo modelo de dos capas se desarrolla que modele más de cerca las condiciones de campo de los materiales, dando como resultado un modelo de análisis para resistencias heterogéneas. En este caso se encuentra una capa de arcilla de 47 metros de altura y una capa de 3 metros del material de análisis (Figura 50), bajo las mismas condiciones de contorno y nivel freático (5 metros).

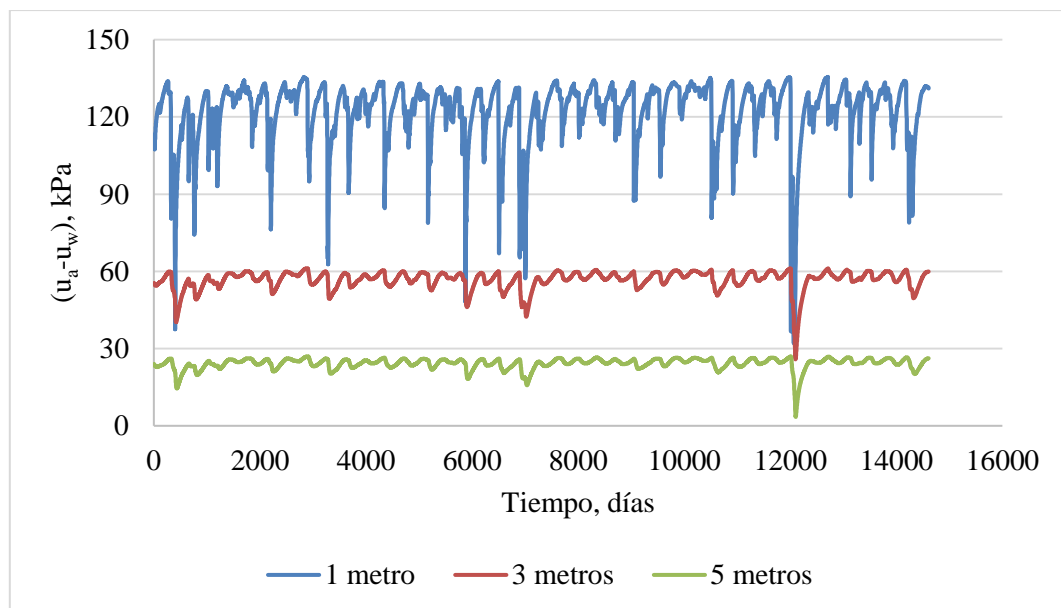


**Figura 50.** Modelo bicapa para una columna de 50 metros

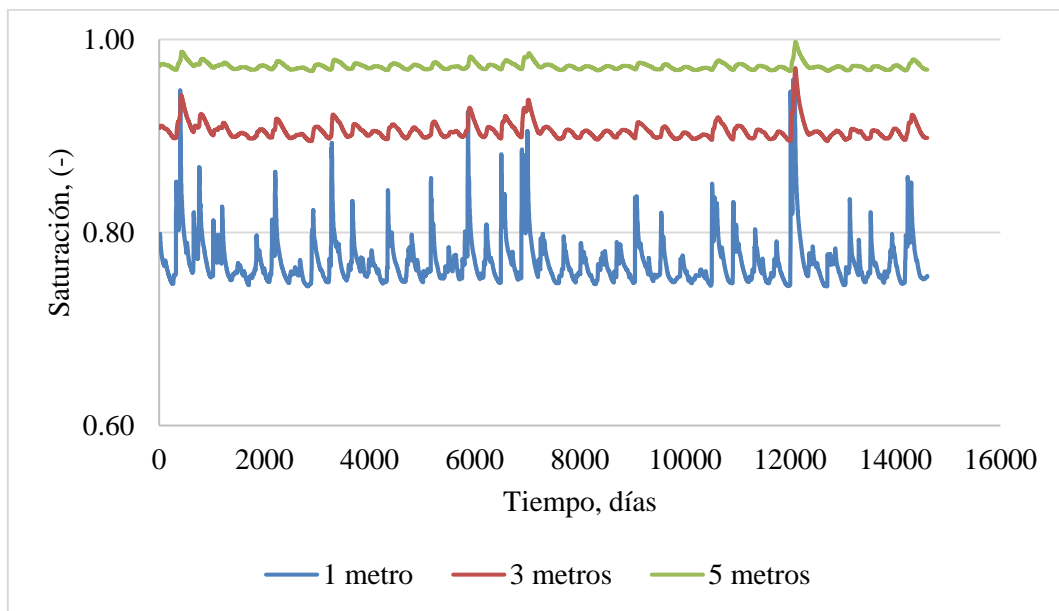
### Modelo NF 5

El modelo de la columna de limo debido a las diferencias en los parámetros de la curva de retención y permeabilidad intrínseca del material desarrolla succiones menores en el punto crítico de análisis. Para un metro por debajo de la superficie estos valores se encuentran entre 30 y 130 kPa (Figura 51).

Y a diferencia del modelo de arcilla el punto medio se encuentra entre los valores máximos. Siendo el peso de la influencia de la precipitación más grande en el desarrollo de las presiones líquidas, que la intervención de los procesos de calor.



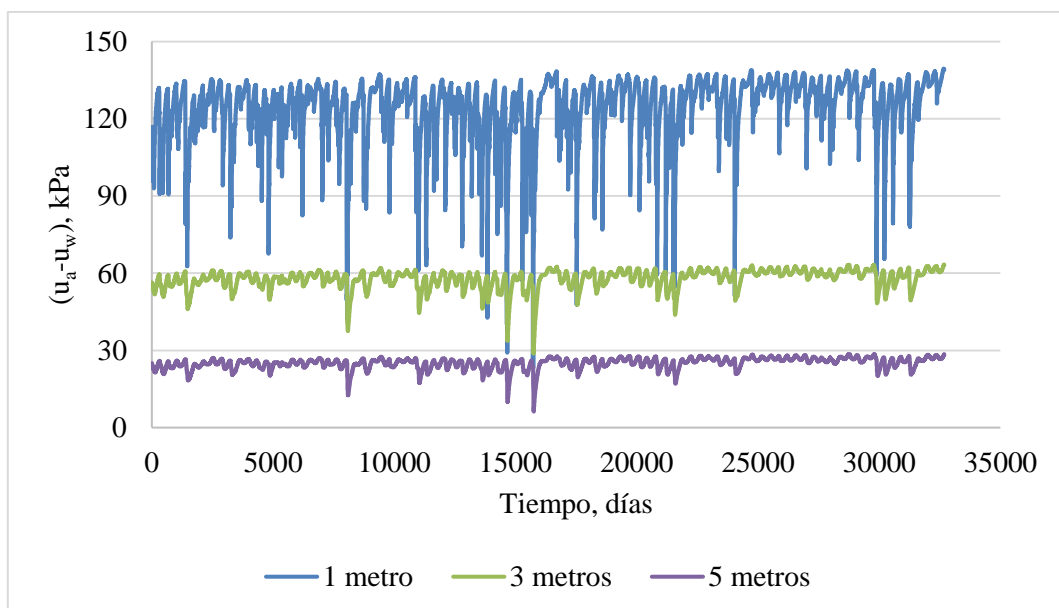
**Figura 51.** Succión a diferentes profundidades de la columna de limo (1961-2000)



**Figura 52.** Grado de saturación a diferentes profundidades de la columna de limo (1961-2000)

Llegando a desarrollar valores de grado saturación entre 0.75 y en casos particulares alcanzando la saturación (Figura 52). Estado que rara vez se alcanza en la columna de arcilla en la zona no saturada. Esto debido a los valores menores de permeabilidad intrínseca, la estructura formada por los granos de limo a un nivel microestructural de distribución de agua y aire.

Esto permite que eventos de lluvia extrema de intensidad menor alcancen valores de presión intersticial importante que lleguen a superar los valores de estabilización alcanzados en la succión. En periodos húmedos continuos, la acumulación antecedente de lluvia puede intensificar estos valores en relación con el número de eventos de rotura.

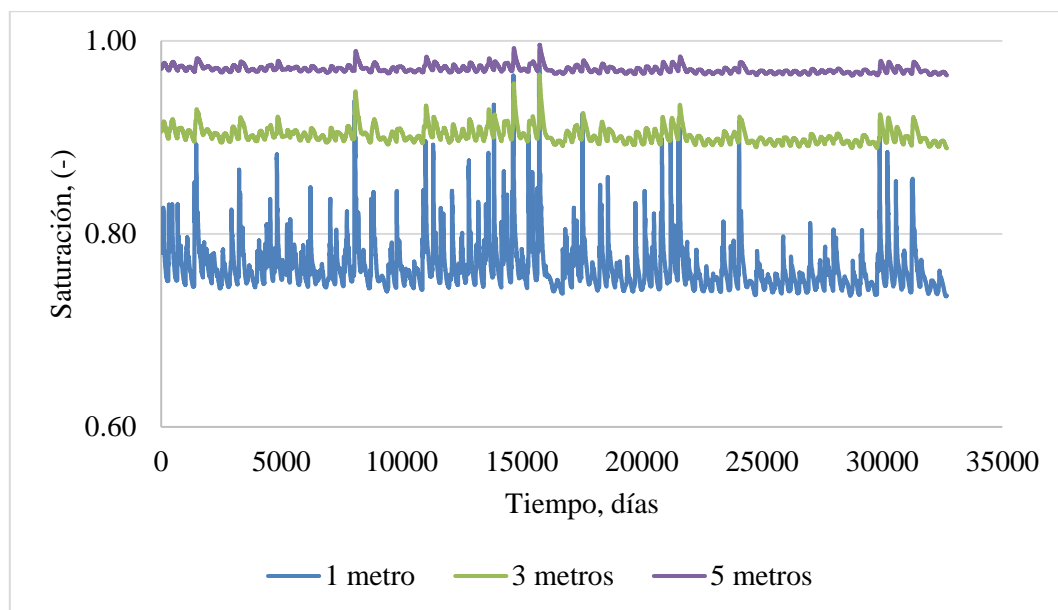


**Figura 53.** Succión a diferentes profundidades de la columna de limo (2011-2100)

Las variantes en los diferenciales de succión aumentan de igual forma en el periodo del 2011-2100, para valores entre 20 y 140 kPa (Figura 53). Con una tendencia lineal a aumentar en la línea del tiempo, pero siendo menor a la de la arcilla y perdiendo influencia a mayores profundidades. Lo que indica menos influencia de los valores de temperatura.

Está pendiente pasa del 0.2% para arcillas de aumento en 90 años a un 0.02% dentro de las tendencias máximas de valores de succión para el caso del limo. Siendo la respuesta directa del rango móvil un valor importante de tasa de cambio entre puntos extremos de presiones líquidas.

De igual forma, el grado de saturación encuentra su afectación bajo los cambios en la temperatura, aunque en menor escala siendo el valor mínimo de 0.73 y encontrando el valor de saturación total en menores casos (Figura 54). Con una pendiente de evolución negativa para el segundo periodo, en consistencia con el aumento de los valores de la succión en la capa. El cual solo es evidente para los primeros metros de estudio, perdiendo significancia a partir del punto de intervención del nivel freático.

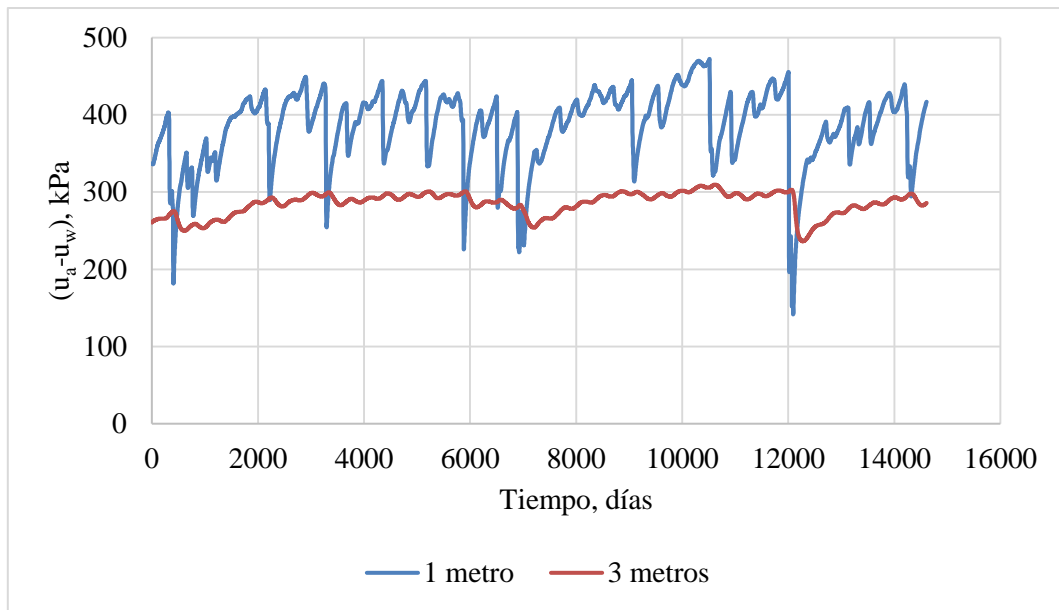


**Figura 54.** Grado de saturación a diferentes profundidades de la columna de limo (2011-2100)

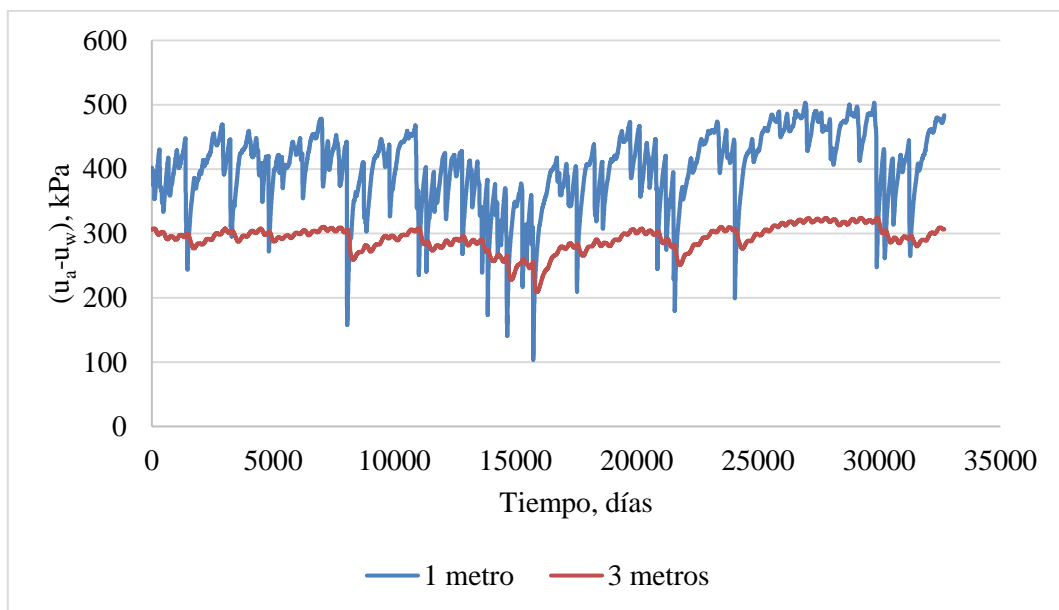
### Modelo Bicapa

Las respuestas de la capa de limo cambian bajo la acción de la columna de arcilla directamente debajo. Lo cual crea casi una estabilización de esta capa al incrementarse los valores de succión alcanzados bajo el modelo termo-hidráulico. Siendo los mínimos y máximos para el punto de 1 metro por debajo de la superficie entre 150 y 450 kPa (1961-2000). Donde los diferenciales en el punto de conexión para el valor de la succión entran en valores de hasta 50 kPa (Figura 55).

Este acoplamiento también afecta la evolución de las presiones, cambiando la velocidad de transferencia de capa a capa, lo cual disminuye la variabilidad de punto a punto.



**Figura 55.** Succión a diferentes profundidades de la columna de limo (1961-2000)



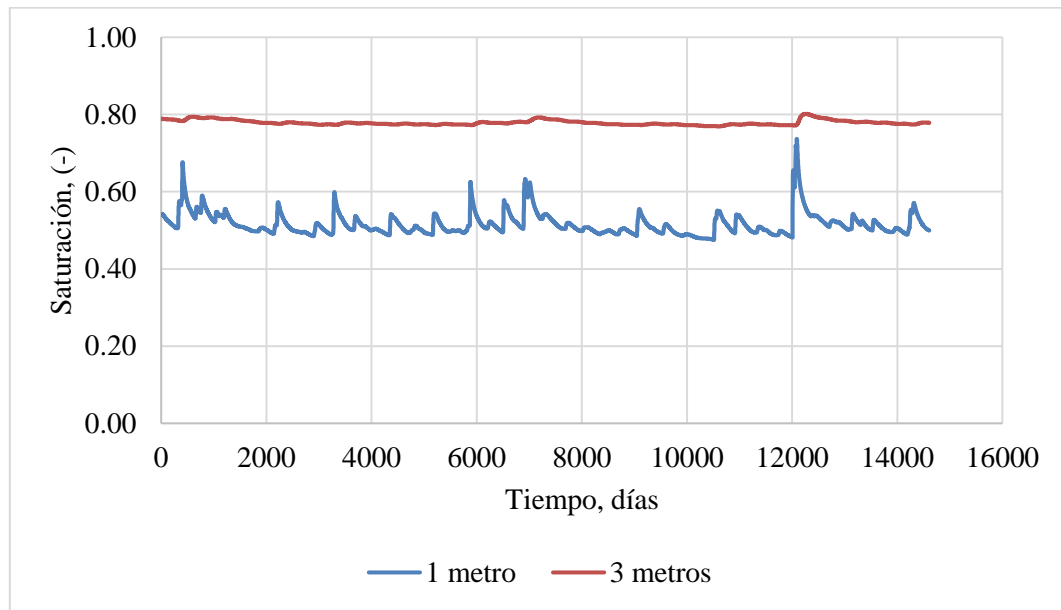
**Figura 56.** Succión a diferentes profundidades de la columna de limo (2011-2100)

Los valores para el periodo 2011-2100 encuentran resultados similares en condiciones entre 100 y 500 kPa para la succión (Figura 56). Debido a esta acción los valores de la pendiente de evolución también aumentan a un estado intermedio entre el modelo previo y su contraparte en el análisis de la arcilla.

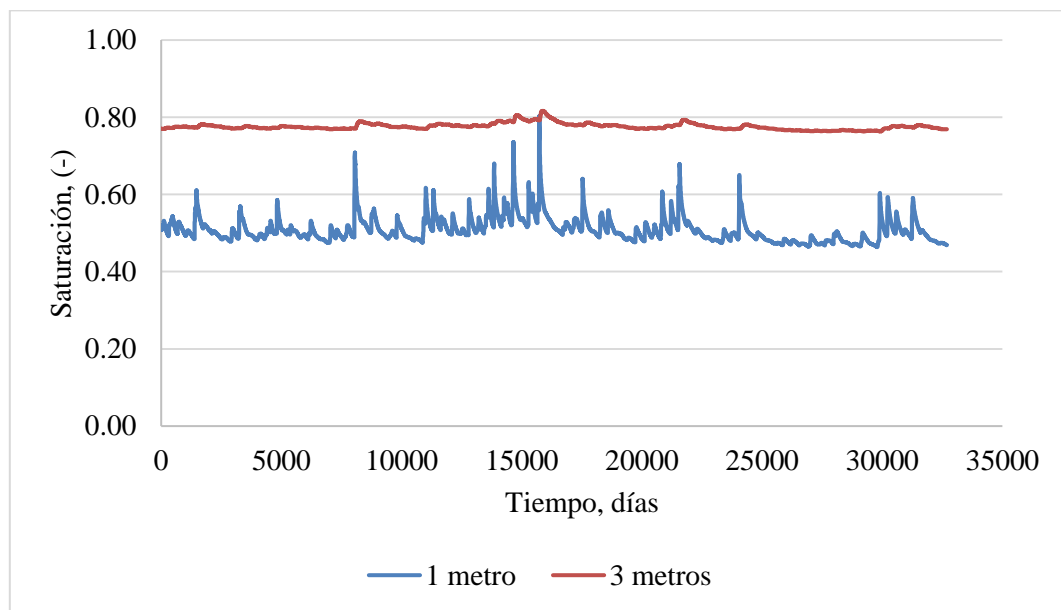
En el caso del grado de saturación disminuye a valores en el rango de 0.5 y 0.8 para la evolución del punto a 1 metro. Mientras que el punto de contacto con la capa de arcilla por encima del nivel freático se mantiene casi constante en valores promedios de 0.8 (Figura 57 y 58).



Estos valores tienen de igual forma que la succión, evoluciones que sugieren una influencia importante por el estado de la precipitación diaria.



**Figura 57.** Grado de saturación a diferentes profundidades de la columna de limo (1961-2000)



**Figura 58.** Grado de saturación a diferentes profundidades de la columna de limo (2011-2100)

### 4.3.3 Arena

Los modelos de arena siguen el mismo patrón de los modelos de limo, tanto para la columna de 50 metros como para el sistema de bicapa. Los valores de data climática para la calibración aumentan de 10 a 20 años, donde los primeros valores de presiones liquidas se encuentran exponencialmente lejos de la zona de equilibrio.

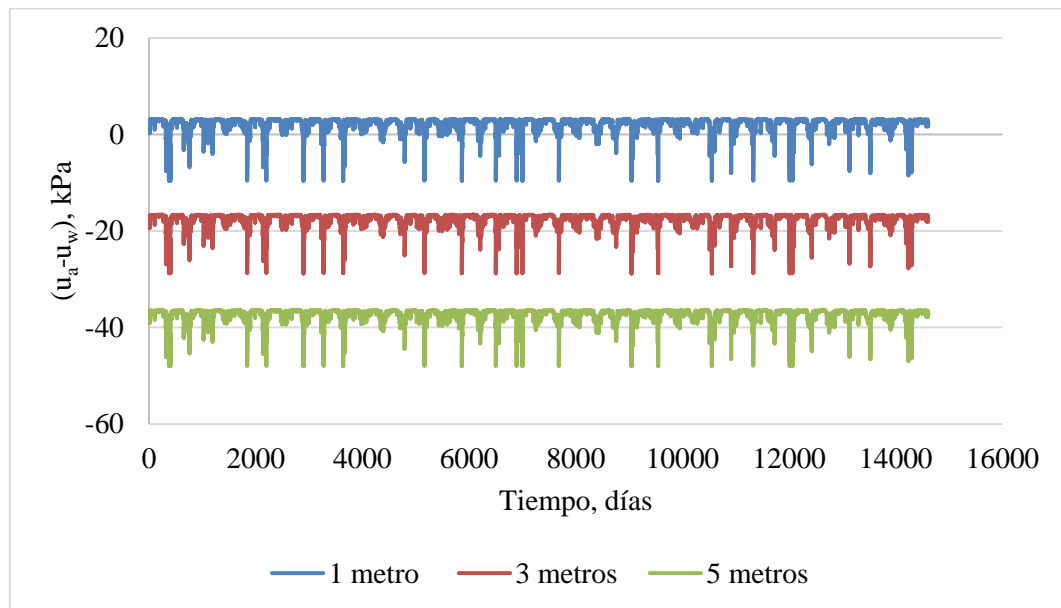
### Modelo NF 5

Para este modelo en la zona por encima del nivel freático inicial, se desarrollan estados en succión solo en los casos máximos de las presiones liquidas, mientras que para eventos

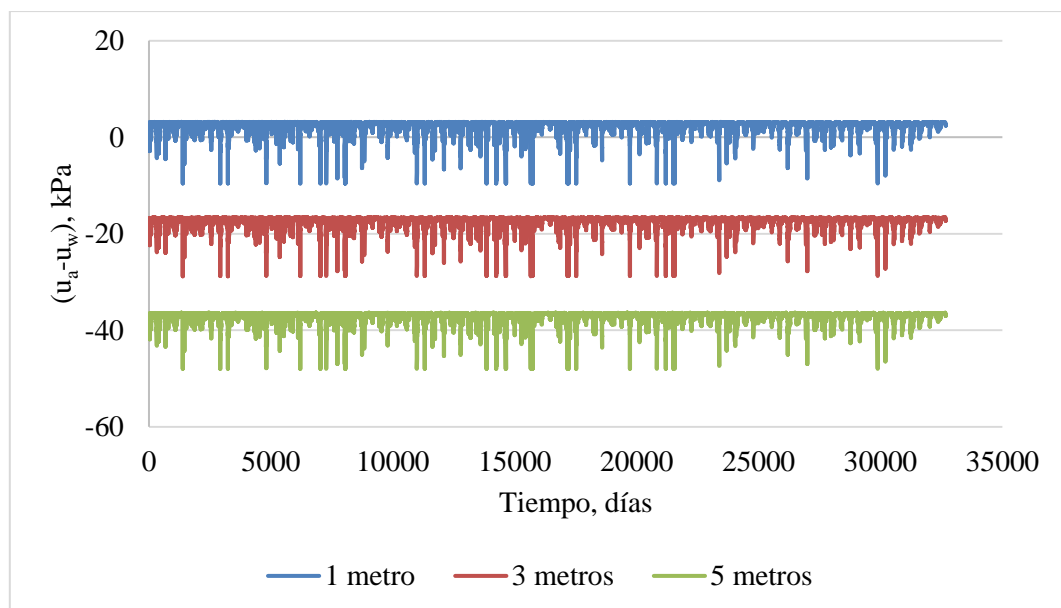
de lluvia y puntos de profundidad mayor el sistema evoluciona solo en presiones intersticiales.

En ambos periodos de estudio estas respuestas mantienen una respuesta constante sin desarrollar valores mayores a pasos más grandes de tiempo, siendo la respuesta directa a precipitaciones (Figura 59 y 60).

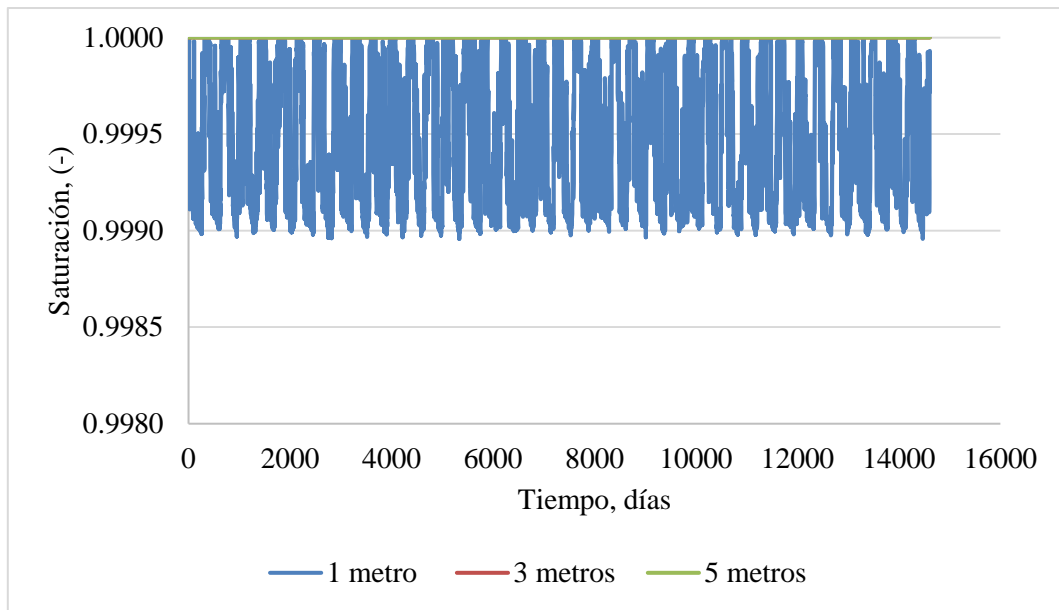
El grado de saturación (Figura 61) del medio permanece un estado muy cerca o completamente saturado para toda la columna de arena en estudio, esto en base a los 130 años de análisis.



**Figura 59.** Succión a diferentes profundidades de la columna de arena (1961-2000)



**Figura 60.** Succión a diferentes profundidades de la columna de arena (2011-2100)



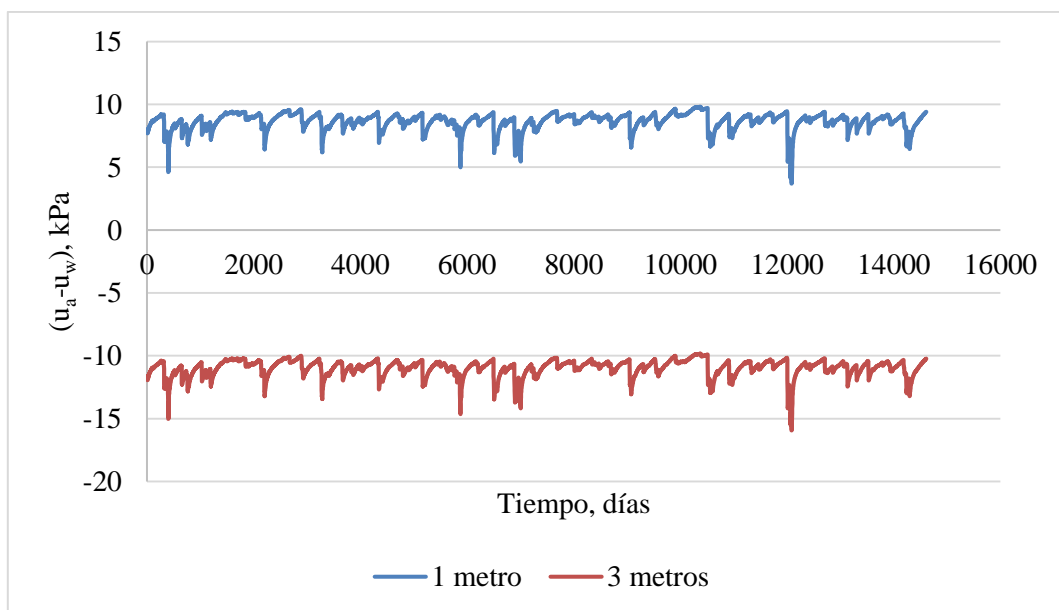
**Figura 61.** Grado de saturación a diferentes profundidades de la columna de arena (1961-2000)

### Modelo Bicapa

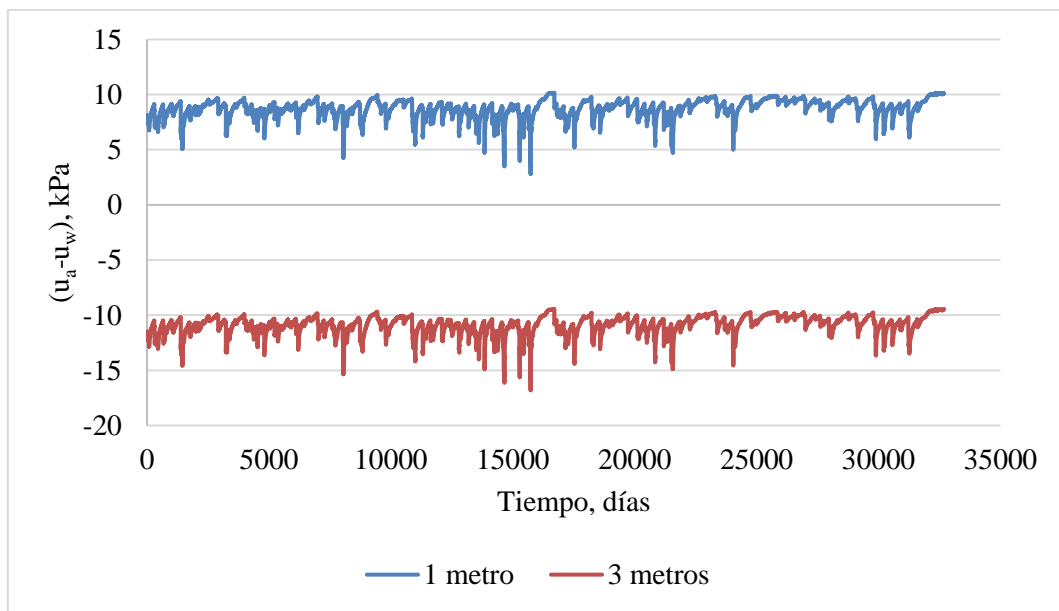
Al igual que en el modelo de bicapa del limo, la inclusión de la capa de arcilla en la parte posterior del modelo permite que los primeros metros de material en análisis desarrollen valores de succión superiores a los estados anteriores.

La tendencia general del primer metro de análisis detalla valores entre 5 y 10 kPa para la succión, siendo este último valor el promedio general de la línea de estudio, sin cambios de pendiente a lo largo de las respuestas a las precipitaciones diarias (Figura 62 y 63).

Se puede identificar un comportamiento similar donde el acoplamiento afecta la evolución de las presiones y el estado de variación de punto a punto.

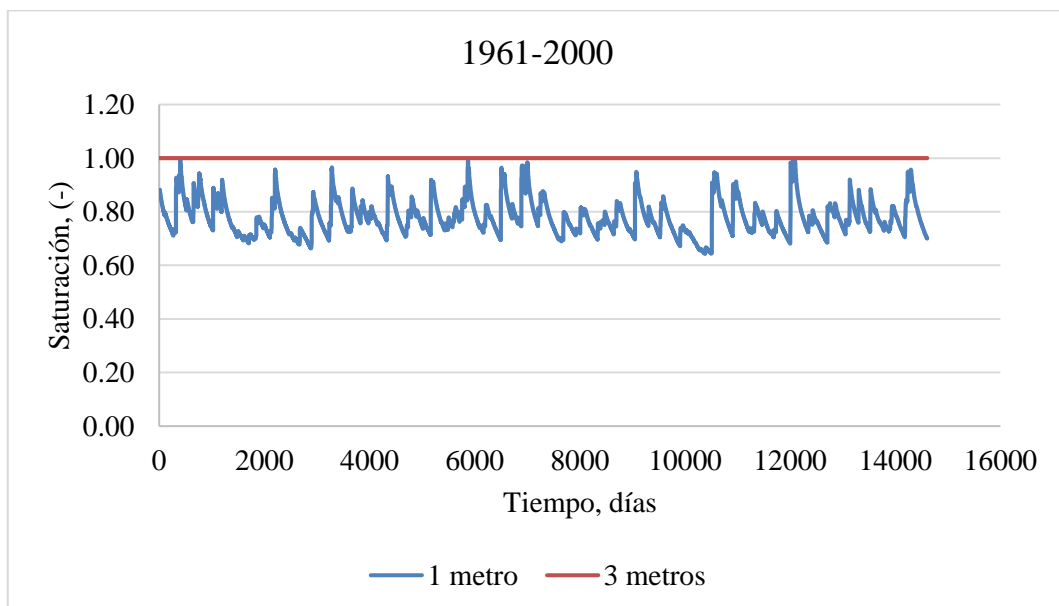


**Figura 62.** Succión a diferentes profundidades de la columna de arena (1961-2000)



**Figura 63.** Succión a diferentes profundidades de la columna de arena (2011-2100)

Otro punto por establecer es el cambio en los promedios de grado de saturación, donde el punto de estudio muestra valores entre 0.6 y 1 (Figura 64); siendo un diferencial al estado anterior donde la columna se encontraba completamente saturada. Donde los cambios de estado se producen a un gradiente menor, permitiendo estados de cuasi almacenamiento, al comparar los valores de permeabilidad entre los modelos.

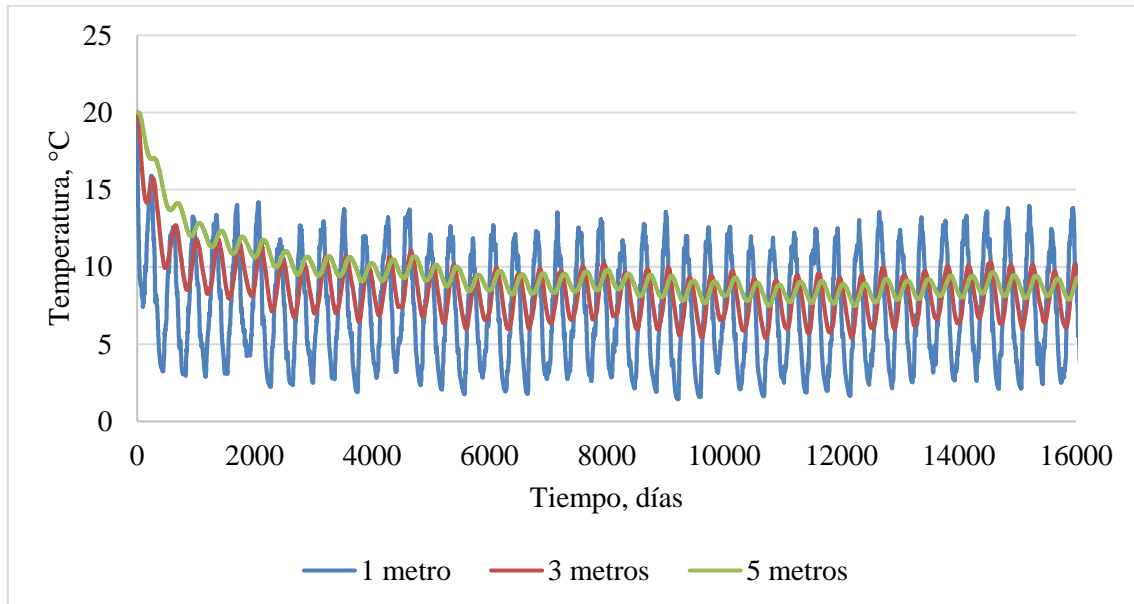


**Figura 64.** Grado de saturación a diferentes profundidades de la columna de arena (1961-2000)

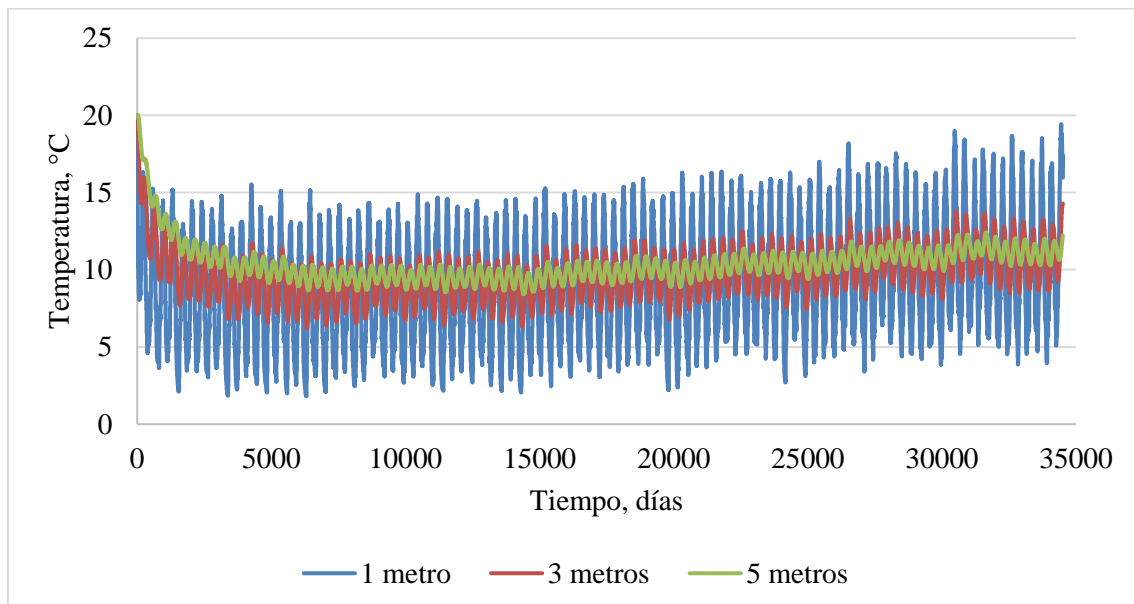
#### 4.3.4 Temperatura

Uno de los parámetros de influencia en la evolución de las presiones líquidas en la columna unidimensional es la temperatura dentro de los datos atmosféricos.

Estos cambios de temperatura en la columna de suelo debido a las acciones climáticas impuestas en la superficie están relacionadas a las predicciones de cambio climático del modelo, siendo el aumento de las temperaturas uno de los factores condicionantes del factor de seguridad, especialmente para la columna de arcilla.



**Figura 65.** Evolución de la temperatura en la columna de arcilla (1961-2000)



**Figura 66.** Evolución de la temperatura en la columna de arcilla (2011-2100)

Esta influencia tiene mucho más impacto en las capas superficiales del modelo, siendo los diferenciales de mínimos y máximos rangos mucho menores conforme aumenta la profundidad.

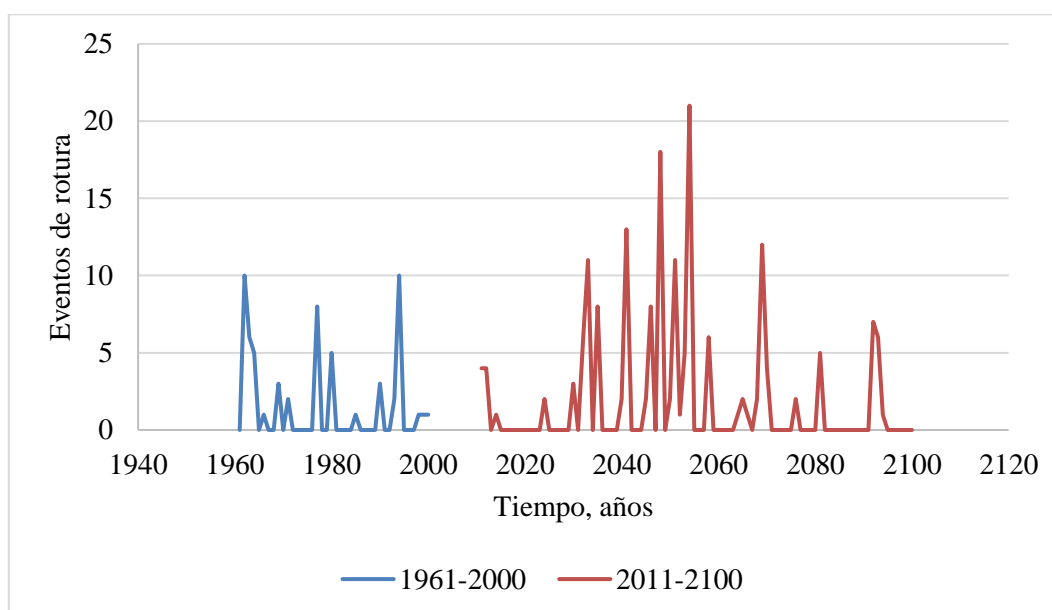
En las Figuras 65 y 66 se describen estos cambios, y estos describen estados consistentes con los valores del índice de temperaturas máximas para los valores de temperatura mínima diaria.

Los patrones de flujo térmico y de transferencia de calor repercuten su influencia en los procesos de almacenamiento de masa, los valores de la conductividad hidráulica, cambios en los grados de saturación y las presiones líquidas, lo cual crea las alteraciones en los procesos de flujo de agua.

#### 4.4 *Análisis de Estabilidad (FS)*

El primer modelo para la arcilla describe una evolución de factor de seguridad que sigue el comportamiento de los cálculos de presiones líquidas, específicamente para el 2011-2100 donde el aumento de los estados de succión describe el mismo comportamiento para la estabilidad del talud a partir de la segunda mitad de la época. A su vez los valores mínimos alcanzados entran en rangos muchos menores a los de la época predecesora lo cual indica eventos extremos más críticos para estos lineamientos mecánicos e hidráulicos.

Cuando se analizan los eventos de rotura anuales estimados para el modelo, obtenemos la evolución de la Figura 67. En el cual se pueden describir diferentes estados, el primero siendo el aumento del período de retorno de los años en cual el número de eventos críticos, para el 1961-2000 de alrededor 12 años y para el 2011-2100 con un descenso estable hasta alcanzar 4 años.

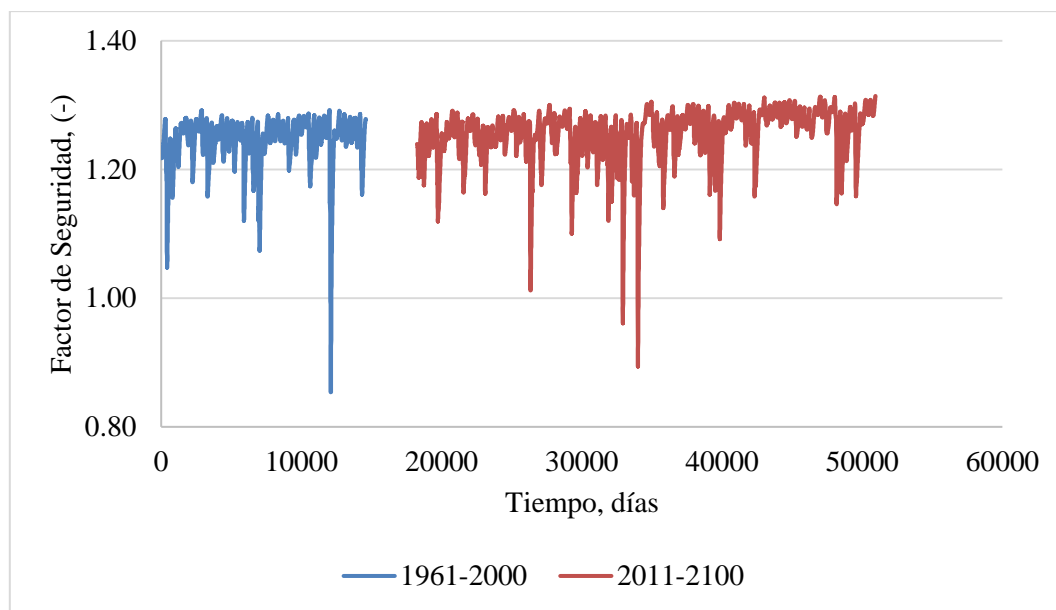


**Figura 67.** Número de eventos de rotura anuales para el análisis de la arcilla

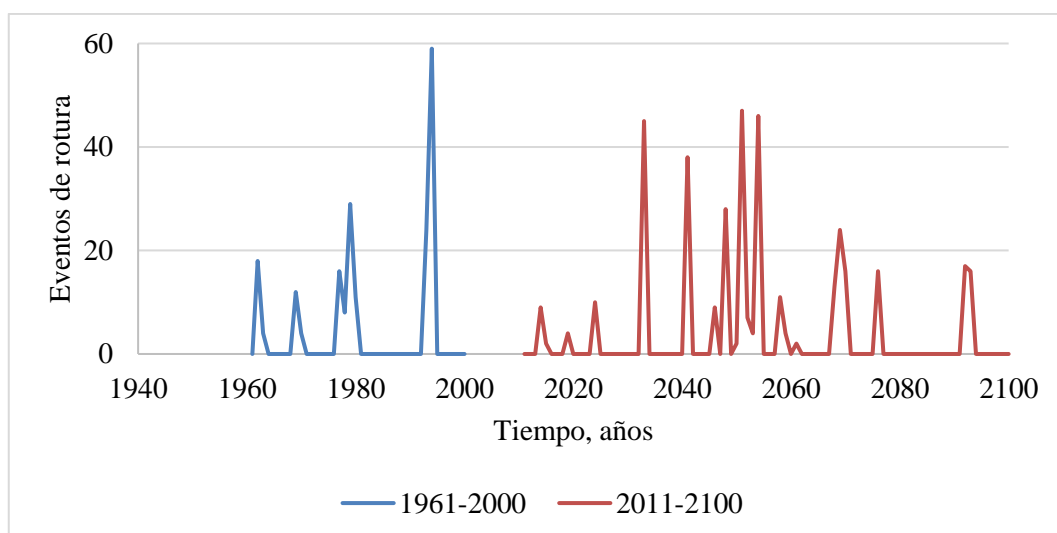
Se ilustra a la vez que para el periodo del 2011-2040 las afectaciones de los índices de temperatura mínimas (siendo los valores absolutos mayores de su rango para este temporal) intervienen en la evolución de la estabilidad del medio. Mientras que el período entre 2041-2070, donde los valores de temperatura y precipitación presentan una mejor aproximación a los valores de predicción para la zona mediterránea europea, expresa un

estado de cambio que mejor representa los procesos de cambio climático. Por último, la sección 2071-2100 al expresar valores de temperatura mayores al umbral esperado y la pérdida de intensidad de precipitación anual, encuentra valores de succión elevados que apoyan los estados de estabilidad general.

El segundo modelo para los parámetros del limo (Figura 68) experimenta un estado similar al modelo de arcilla en significancia con la pendiente de aumento de los valores del factor de seguridad del periodo 2011-2100, pero a una menor escala y donde se empiezan a describir una relación más pronunciada a los cambios de precipitación. Por lo cual, el número de incidencias aumenta para los años que presentan inestabilidad (Figura 69).



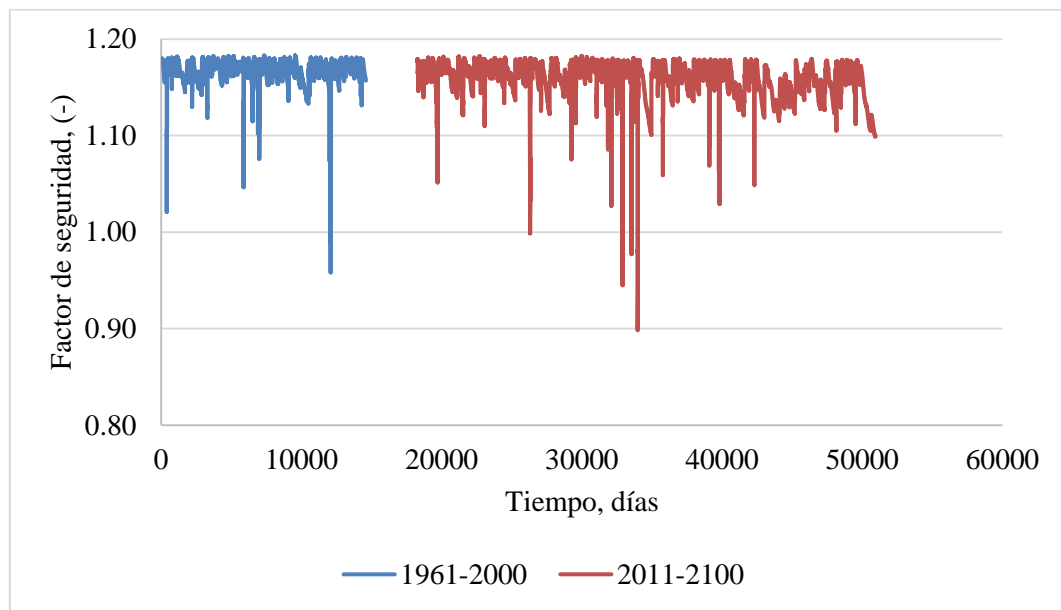
**Figura 68.** Evolución del Factor de Seguridad – Limo



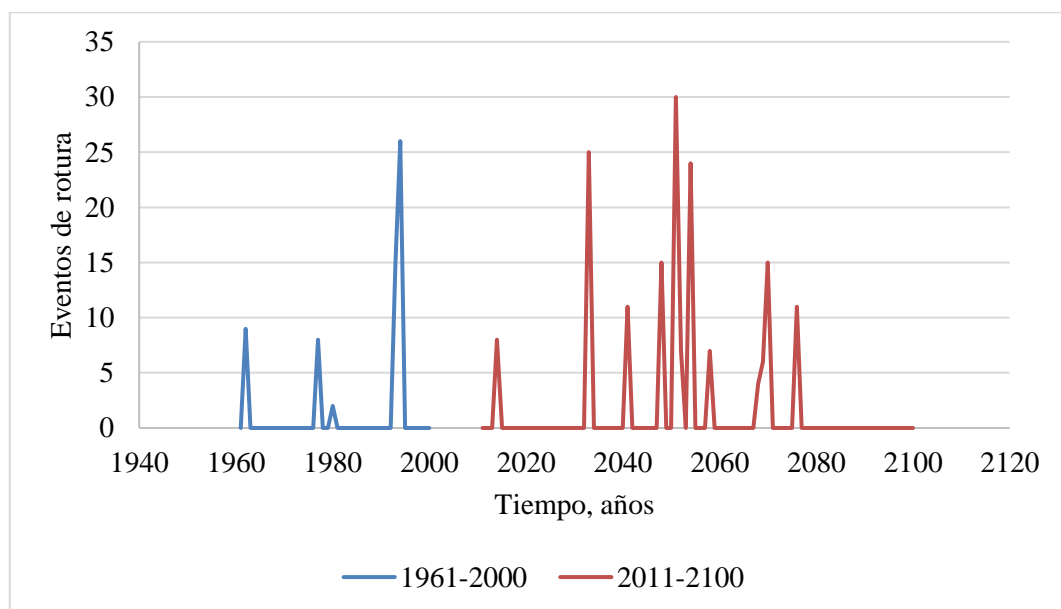
**Figura 69.** Número de eventos de rotura anuales para el análisis del limo

El modelo de para la arena se estudia para los parámetros de resistencia heterogénea del modelo bicapa. En cuestiones de evolución del factor de seguridad sigue una tendencia casi constante a lo largo de la línea del tiempo para un valor promedio máximo de 1.18, mientras que los estados críticos parecen estar más sujetos a cambios en la precipitación (Figura 70).

De la misma manera que en modelos anteriores los valores mínimos críticos alcanzan valores de más amplio rango en el segundo período de estudio.



**Figura 70.** Evolución del factor de seguridad – resistencia heterogénea (Arena – Arcilla)



**Figura 71.** Número de eventos de rotura anuales para el análisis de la arena



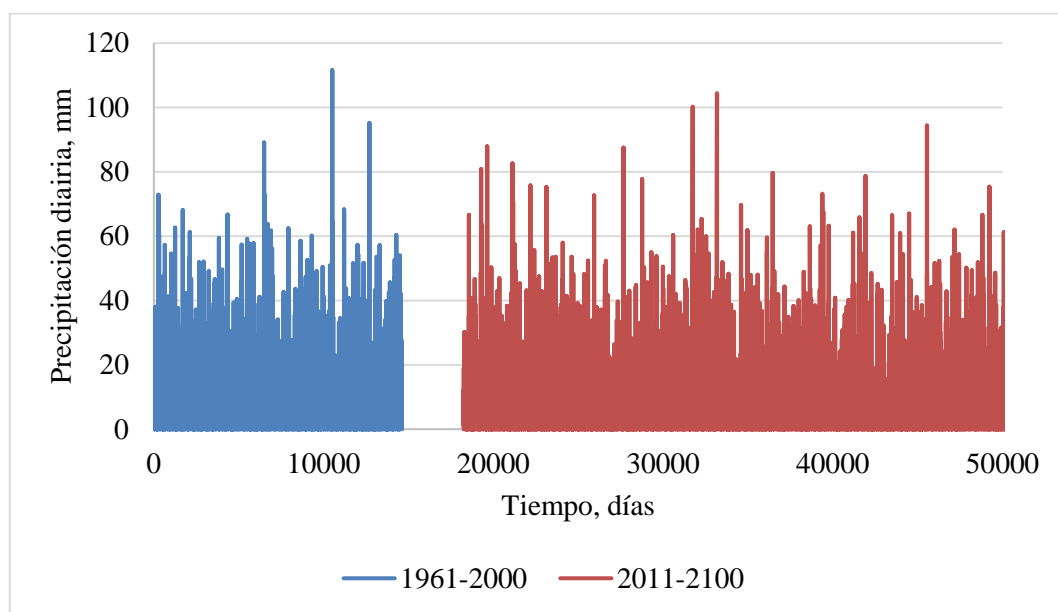
Por último, se evalúan las incidencias de los eventos críticos en la capa de 1 metro de profundidad y se establece el número anual de procesos de rotura (Figura 71). Y se ilustran los cambios en los períodos de retorno para los ciclos de temperatura y precipitación. Donde podrían haberse presentado un mayor número de incidencias, siguiendo las tendencias del limo, para el modelo de una sola capa, pero la heterogeneidad del modelo disminuye este valor.

#### 4.4.1 Contexto climático

En la evolución del modelo de arcilla podemos ver un descenso de los eventos de rotura para la segunda mitad del periodo de 2011-2100. Aunque los periodos se mantienen en valores bajos, el número de eventos disminuye. Esto puede relacionarse al aumento de las temperaturas y el descenso de la magnitud de las precipitaciones.

Al comparar los valores de evolución del factor de seguridad se pueden encontrar relaciones con los factores climáticos estudiados especialmente en los índices para precipitación y temperaturas máximas y mínimas.

Para el modelo de arena se puede establecer una relación directa al estado de las precipitaciones diarias estimadas (Figura 72), mientras que los modelos de limo y arcilla entran en una combinación con el estado de la temperatura.



**Figura 72.** Evolución de la precipitación diaria

En los modelos los valores de rotura pueden relacionarse a los valores de precipitación a través de la intensidad diaria, al coincidir para valores en promedio entre 40 y 60 mm para eventos extremos. Mientras que los años máximos para cada periodo en particular están afectados por precipitaciones por encima de 90 mm. Lo cuales son valores necesarios para superar los estados de estabilidad bajo las condiciones hidráulicas y mecánicas de las tipologías locales.

En los tres modelos se describen los mismos años de eventos de rotura más prominentes: 1994 para 1961-2000 y 2054 para el 2011-2100.

Cuando se comparan los índices climáticos de estos años específicos con los promedios de sus respectivos periodos, podemos ver valores de temperaturas máximas tanto en los promedios medios y los promedios máximos, estos tienden a estar en los puntos elevados por encima de los promedios anuales. También en cuestiones de índices de heladas, los valores son mucho menores. Tal como se detalla en las Tablas 12 y 13. Lo cual nos indica años muy cálidos dentro sus periodos.

**Tabla 12.** Índices de temperatura para eventos críticos (1994)

	Promedio	Mínimo	Máximo	<b>1994</b>
TMax	10.4	8.8	12.5	11.1
TMin	2.5	1.0	3.6	3.4
TXx	26.2	28.9	23.0	25.9
TNx	13.2	11.3	15.2	14.6
CSDI	5.15	0	16	0

**Tabla 13.** Índices de temperatura para eventos críticos (2054)

	Promedio	Mínimo	Máximo	<b>2054</b>
TMax	12.9	9.3	17.6	12.0
TMin	4.2	1.9	6.3	3.4
TXx	30.3	24.7	38.8	30.0
TNx	15.8	11.6	20.6	16.5
CSDI	7	0	46	6

Otro factor que considerar son las precipitaciones, que en cuestiones de promedios anuales se encuentran dentro de los valores medios normales. Pero ciertamente el año anterior a cada uno de estos picos, resulta en un año relativamente activo en cuestiones de índices de precipitación, lo cual detalla estados críticos de presiones líquidas. (Tabla 14 y 15).

**Tabla 14.** Índices de precipitación para eventos críticos (1994)

	Promedio	Mínimo	Máximo	<b>1994</b>	<b>1993</b>
RX5	119.9	73.1	177.5	121.7	177.5
SDII	7.6	5.8	9.8	7.4	9.2
R20	15	7	28	11	22
R25	9	1	19	6	14
R95TOT	319.2	33.2	576.1	223.1	511.8
CWD	15	10	23	16	21
PRCPTOT	1300.9	864.1	1744.4	1221.8	1535.2

En cuestiones de comparación de estos años, ambos periodos permanecen con valores de acumulación anual similares, pero los valores para eventos extremos mayores a 20 o 25 mm de lluvia se mantienen constantes para el 2054 respecto al 1994, aún al considerar la disminución de las precipitaciones anuales.

Este factor también ilustra la importancia de los eventos antecedentes y su almacenamiento, en el comportamiento de rotura. Ya que modelos de líneas de tiempo donde se evalúan estos años solos no producen las mismas reacciones bajo las condiciones atmosféricas.

**Tabla 15.** Índices de temperatura para eventos críticos (2054)

	Promedio	Mínimo	Máximo	<b>2054</b>	<b>2053</b>
RX5	110.0	50.4	213.6	110.3	123.1
SDII	7.4	4.9	9.4	7.3	8.4
R20	13	2	25	14	24
R25	8	1	16	7	16
R95TOT	279.6	27.8	521.6	202.3	470.9
CWD	15	8	35	10	35
PRCPTOT	1142.9	573.9	1569.2	1059.7	1506.6

## 5 Conclusiones

El trabajo de investigación se centra en efectuar un análisis de estabilidad de taludes dentro del marco del proyecto SMuCPhy, mediante un modelo numérico desarrollado en Code Bright, al considerar los efectos de las acciones climáticas características de las proyecciones de cambio climático. Los valores desencadenantes se estudian al incorporar modelos predictivos de regionales para periodos desde 1961 – 2100, para el cual se considera el modelo global SMHI-ECHAM5-r3/RCA3(A1B) como la proyección de cambio climático más adecuada para el tratamiento de la zona de estudio de la estación Senet (0.75 E; 42.5 N) al norte de Lleida, frontera con Aragón.

Los modelos climáticos regionales predicen cambios importantes para la zona europea mediterránea, donde la temperatura aumenta y las precipitaciones en la temporada de invierno disminuyen. Estos valores disminuirán el nivel freático lo cual podría interpretarse como un factor hacia la estabilidad, pero al incluirse la desecación del terreno debido a las temperaturas, provoca vías de infiltración que en eventos de lluvia extrema en verano crea deslizamientos de mayor impacto al aumentar de manera acelerada las presiones de agua en el terreno.

Al existir un número significativo de fuentes y trabajos enfocados en esta problemática, la primera etapa del proyecto se centra en discernir el modelo climático a utilizar. Siendo el proceso de reducción de escala, ya sea estadístico o de proyecciones dinámicas, uno de los elementos que eleva la variabilidad de respuesta en relación con los datos observacionales.

De allí que la utilización de los índices de cambio climático permitió evaluar la evolución de los elementos de mayor interés y establecer la correlación entre el SMHI-ECHAM5-r3 y Spain02. Siendo los resultados para la precipitación anual, temperaturas máximas y mínimas, una aproximación buena dentro del rango de error normal y que proporciona la mayor confiabilidad para los periodos de estudio. Se han tenido en cuenta la dispersión presente en los estudios en base a cálculos respecto a datos procedentes de estaciones meteorológicas o de modelos predictivos, el área de estudio y su resolución.

Al evaluar la respuesta de los índices del modelo predictivo se obtiene que el temporal entre 2041-2070 representa los valores de cambio más cercanos a las condiciones generales de transición en base a los estados de temperatura y precipitación, lo cual se ve reflejado en los valores de estabilidad de taludes.

La calibración del modelo unidimensional en Code Bright bajo las ecuaciones constitutivas del medio, las condiciones iniciales, parámetros del material y los elementos atmosféricos; bajo una serie de combinaciones y análisis de los resultados de presiones líquidas y saturación, que al final permitan obtener un medio que mejor represente el estado de la columna unidimensional. Donde se obtuvo al final una condición de salida de masa en la base, de 5 y 20 años de calibración bajo acción climática y un estado inicial de nivel freático de 5 metros bajo la superficie. A su vez la integración del sistema acoplado de resistencia heterogénea para el estudio de limos y arenas.

El funcionamiento de los modelos en sistemas como Code Bright donde se establecen las interacciones geométricas, térmicas e hidráulicas depende de los flujos y balance de energía, agua y aire, al igual que las leyes constitutivas del material. De ello dependerá como el talud responde a los factores climáticos y de allí los valores obtenidos tanto en los puntos elevados de succión de hasta 600 kPa en arcillas, hasta el desarrollo de las

presiones intersticiales en las arenas, como los valores del grado de saturación, en los procesos de transferencia y balance de masa y energía.

En los casos de análisis de estabilidad de taludes, las condiciones geométricas y los parámetros termo hidráulicos al modelarse en combinación con los componentes climáticos como los eventos de precipitación extrema, establecen los estados de equilibrio y los puntos desencadenantes dentro del estudio de los factores de seguridad; siendo la permeabilidad y las curvas de retención las variables de mayor impacto.

Los parámetros descriptivos de las curvas de retención para las diferentes tipologías de suelos han sido estudiados como un factor de refuerzo mecánico e hidráulicos al reducir los niveles de presión a través de la absorción del agua infiltrada en el talud, pero estos efectos de la succión en la estabilidad del talud disminuyen al aumentar la intensidad de las precipitaciones.

La intensidad y duración de la precipitación permanece a través de todos los estudios de análisis de estabilidad como uno de los factores desencadenantes con mayor influencia dentro de los campos climáticos, al intervenir directamente en el aumento de las presiones en el talud. Los valores de permeabilidad e infiltración como parámetros del suelo intervienen directamente en el nivel de afectación de la lluvia.

Otro factor importante que incluir son los valores de temperatura, los cuales influyen en los patrones de flujo térmico y de transferencia de calor y en los procesos de almacenamiento de masa, los valores de la conductividad hidráulica, cambios en los grados de saturación y las presiones líquidas, lo cual crea las alteraciones en los procesos de flujo de agua.

Los patrones del factor de seguridad de los taludes tipo permiten entender los cambios el número de eventos de rotura estimados a una escala anual y los factores desencadenantes. Donde se puede ilustrar el efecto de los valores de la succión en la estabilización del terreno, y su relación en los cambios de temperatura, esto en relación principalmente con la arcilla y menor medida con la tipología de limo.

Se tienen que los procesos de mayor impacto surgen en años bajo índices climáticos de temperaturas elevadas o por encima de los promedios de sus categorías. Y a la vez, los valores de precipitación se mantienen en rangos promedios, lo que describe años húmedos. Pero siendo el factor de lluvias antecedentes un parámetro vital en la transición a las presiones intersticiales desencadenantes.

En promedio estos episodios de rotura se estiman para precipitaciones entre 40 y 60 mm, encontrándose los grandes movimientos en eventos de lluvia extrema de 90 mm; lo cual es común para la capacidad de almacenamiento del terreno.

El período 2041-2070 ilustra el aumento referencial de los eventos de rotura y disminución de los períodos de retorno para las tres tipologías de suelos. Condicionando los parámetros de cambio climático de la zona de estudio a puntos de riesgo para estos escenarios de análisis y emisiones.

La presencia de un número estable de eventos de lluvia extremas, en el segundo periodo de análisis, a pesar de la disminución de la precipitación anual, describe un incremento de lluvias de mayor intensidad y temporalmente más concentradas y en reducción a nivel de la zona espacial afectada; pero sin cambiar el número de eventos anuales, lo cual es un factor desencadenante importante dentro de los estudios de estabilidad de laderas.

### **5.1 Futuras líneas de investigación**

- El presente trabajo muestra una de las perspectivas de estudio en el campo de estabilidad ante acciones climáticas, otros modelos pueden analizar la variabilidad de los modelos globales y los proyectos de reducción de escalas regionales, al introducir sus respectivos valores al sistema y explorar las diferentes reacciones y susceptibilidades de los parámetros.
- La correlación de los valores observacionales y los resultados de las reducciones de escala, tanto estadísticas como proyecciones dinámicas, pueden intervenir en los índices de cambio climático y sus aproximaciones a los eventos extremos más sensitivos en los campos de estabilidad.
- Este modelo a su vez este sujeto a uno de los escenarios de emisiones de gases invernaderos para el proyecto SRES de reportes del IPCC. A partir de otros estudios surge una línea de escenarios a través de las trayectorias de concentración representativas (RCP) en base a estimaciones de cambios de la radiación. Estos valores pueden introducir nuevos parámetros de respuesta en el medio.
- Otra propuesta se centra en realizar estudios específicos en relación con el término de la radiación, introduciendo correcciones para los términos de onda larga y onda corta como elementos de la matriz de data atmosférica.
- A su vez se pueden llevarse a cabo estudios en referencia a la reactivación de movimientos históricos antes las acciones climáticas, siendo estos más comunes en la zona de estudio, y evaluar los términos mecánicos residuales del entorno para obtener una respuesta más cercana a la realidad de la ladera.
- Una serie de estudios se enfoca en la influencia de la vegetación y las raíces como términos importantes en la estabilidad de deslizamientos superficiales. Nuevas proyecciones pueden acoplar estos parámetros al modelo termo hidráulico.
- Por último, la utilización del modelo de Barcelona puede incorporar elementos importantes a la evaluación de la zona no saturada del modelo. Siendo los valores alcanzados en succión un punto importante en el tratamiento del factor de seguridad.
- Análisis de sensibilidad de los parámetros geométricos del sistema de talud infinito para los valores críticos de rotura.

## Referencias

- Alonso, E. E., García Merino, J. V., Lloret, A. (1992). Efecto de la infiltración de agua en la estabilidad de taludes de suelos parcialmente saturados. *III Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables*, (1976), 387-398.
- Alonso, E. E., Gens, A., Delahaye, C. H. (2003). Influence of rainfall on the deformation and stability of a slope in overconsolidated clays : a case study. *Hydrogeology Journal*, 174-192.
- Alvioli, M., Melillo, M., Guzzetti, F., Rossi, M., Palazzi, E., von Hardenberg, J., ... Peruccacci, S. (2018). Implications of climate change on landslide hazard in Central Italy. *Science of the Total Environment*, 630, 1528-1543.
- Buma, J., Dehn, M. (1998). A method for predicting the impact of climate change on slope stability. *Environmental Geology*, 35(2-3), 190-196.
- Chow, V. Te, Maidment, D. R., Mays, L. W. (1988). *Applied Hydrology* (Internatio.). McGraw Hill.
- Collison, A., Wade, S., Gri, J., Dehn, M. (2000). Modelling the impact of predicted climate change on landslide frequency and magnitude in SE England, 55, 205-218.
- Corominas, B., Moreno, J. M. (2005). 12. Impactos Sobre Los Riesgos Naturales De Origen Climático. *Impactos del cambio climático en España*, 549-579.
- Corominas, J., García Yagüe, A. (1997). Terminología de los movimientos de ladera. En *IV Simposio nacional sobre taludes y laderas inestables. Granada* (Vol. 3, pp. 1051-1072).
- Corominas, J., Moya, J. (1999). Reconstructing recent landslide activity in relation to rainfall in the Llobregat River basin, Eastern Pyrenees, Spain. *Geomorphology*, 30(1-2), 79-93.
- Crozier, M. J. (2010). Deciphering the effect of climate change on landslide activity : A review. *Geomorphology*, 124(3-4), 260-267.
- Dehn, M., Bu, G., Buma, J., Gasparetto, P. (2000). Impact of climate change on slope stability using expanded downscaling. *Engineering Geology*, 55, 193-204.
- Departament d'Enginyeria del Terreny, C. i geofísica. (2017). CODE\_BRIGHT Tutorial Manual, (March).
- Division of Geotechnical Engineering and Geosciences, U. (2018). *Code Bright User's Guide*.
- Dosio, A. (2016). Projections of climate change indices of temperature and precipitation from an ensemble of bias-adjusted high-resolution EURO-CORDEX regional climate models. *Journal of Geophysical Research*, 121(10), 5488-5511.
- EEA. (2017a). *Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2016*.

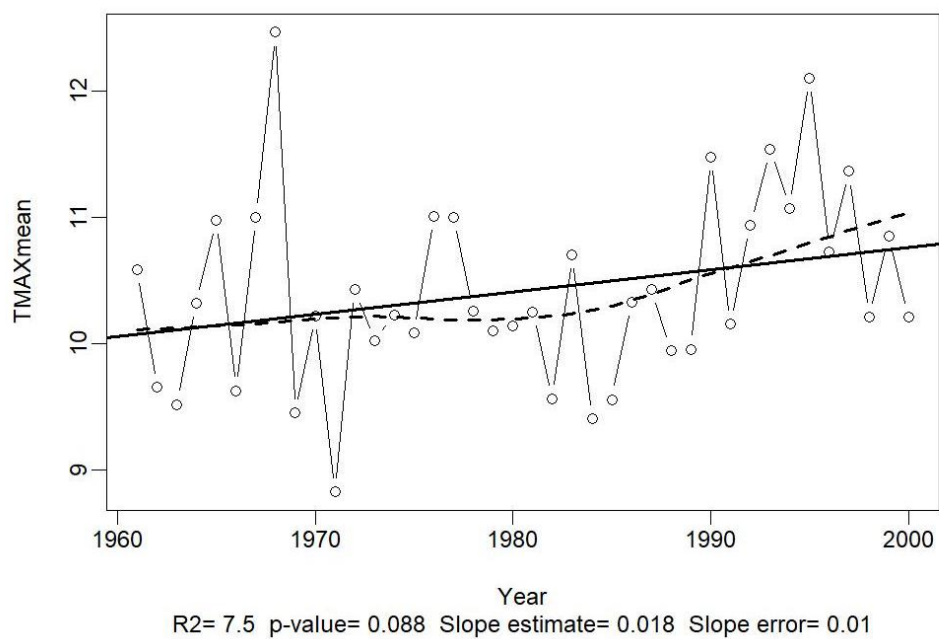
- EEA. (2017b). Key observed and projected climate change and impacts for the main regions in Europe — European Environment Agency. Recuperado 6 de enero de 2019, a partir de <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/key-past-and-projected-impacts-and-effects-on-sectors-for-the-main-biogeographic-regions-of-europe-5>
- Filho, W. L., Trbic, G., Filipovic, D. (2019). *Climate Change Adaptation in Eastern Europe*. Springer International Publishing. doi:10.1007/978-3-030-03383-5
- Gariano, S. L., Rianna, G., Petrucci, O., Guzzetti, F. (2017). Assessing future changes in the occurrence of rainfall-induced landslides at a regional scale. *Science of the Total Environment*, 596-597, 417-426.
- Genuchten, M. T. van. (1980). A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44, 892-898.
- Ghanbarian, B., Daigle, H. (2016). Thermal conductivity in porous media: Percolation-based effective-medium approximation. *Water Resour. Res.*, 52, 295-314.
- Giorgi, F., Im, E. S., Coppola, E., Diffenbaugh, N. S., Gao, X. J., Mariotti, L., Shi, Y. (2011). Higher hydroclimatic intensity with global warming. *Journal of Climate*, 24(20), 5309-5324.
- Giorgi, F., Raffaele, F., Coppola, E. (2019). The response of precipitation characteristics to global warming from climate projections. *Earth System Dynamics*, 10(1), 73-89.
- Herrera, S., Ancell, R., Pons, M. R. (2010). Development and analysis of a 50-year high-resolution daily gridded precipitation dataset over Spain ( Spain02 ), 1-19.
- Houghton, J. T., Meira Filho, L. G., Maskell, K., Griggs, D. J. (1997). *An Introduction to Simple Climate Models used in the IPCC Second Assessment Report*. Intergovernmental Panel on Climate Change.
- IPCC. (2019). Selecting scenarios. Recuperado 5 de enero de 2019, a partir de [http://www.ipcc-data.org/guidelines/pages/scen\\_selection.html](http://www.ipcc-data.org/guidelines/pages/scen_selection.html)
- Karl, T. R., Nicholls, N., Ghazi, A. (1999). CLIVAR/GCOS/WMO workshop on indices and indicators for climate extremes: Workshop summary. En *Weather and Climate Extremes* (Vol. 42, pp. 3-7). Springer, Dordrecht. doi:[https://doi.org/recursos.biblioteca.upc.edu/10.1007/978-94-015-9265-9\\_2](https://doi.org/recursos.biblioteca.upc.edu/10.1007/978-94-015-9265-9_2)
- Kelemen, A., Munch, W., Poelman, H., Gakova, Z., Dijkstra, L., Torighelli, B. (2009). Regions 2020: The climate change challenge for european regions. *European Commission*, (March), 27.
- Liu, H. W., Feng, S., Ng, C. W. W. (2016). Computers and Geotechnics Analytical analysis of hydraulic effect of vegetation on shallow slope stability with different root architectures, 80, 115-120.
- Nakicenovic, N., Davidson, O., Davis, G., Grübler, A., Kram, T., Rovere, E. L. La, ... Dadi, Z. (2000). EMISSIONS SCENARIOS. *Intergovernmental Panel on Climate*



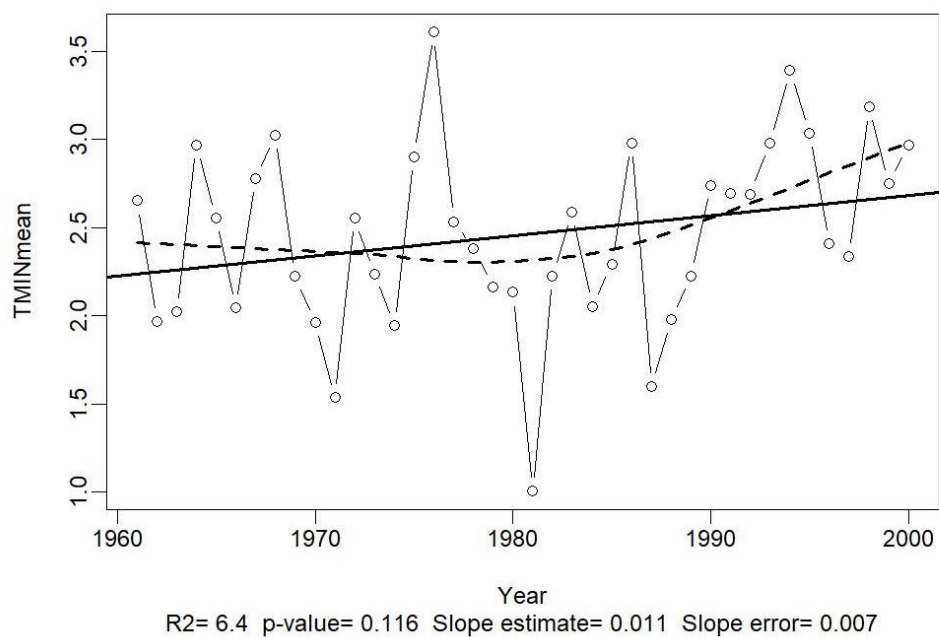
*Change.*

- Patryl, L., Galeriu, D. (2011). Statistical Performances measures - models comparison. *Cea*.
- Powers, E., Abriola, M., Weber, J., Arbor, A. (2005). Experimental investigation of nonaqueous phase liquid dissolution in saturated subsurface systems: steady state mass transfer rates. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 30(3), A156.
- Rahardjo, H., Alonso, E. E., Lloret, A., Gens, A. (2008). Monitoring and modeling of slope response to climate changes. *Landslides and Engineered slopes*, (1996).
- Roeckner, E., Bäuml, G., Bonaventura, L., Brokopf, R., Esch, M., Giorgetta, M., ... Tompkins, A. (2003). The atmospheric general circulation model ECHAM 5. PART I: Model description.
- Samuelsson, P., Jones, C. G., Willén, U., Ullerstig, A., Gollvik, S., Hansson, U., ... Wyser, K. (2011). The Rossby Centre Regional Climate model RCA3: Model description and performance. *Tellus, Series A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 63(1), 4-23.
- Tang, A. M., Hughes, P. N., Dijkstra, T. A., Askarinejad, A., Brenčič, M., Cui, Y. J., ... Van Beek, V. (2018). Atmosphere–vegetation–soil interactions in a climate change context; impact of changing conditions on engineered transport infrastructure slopes in Europe. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*.
- Turco, M., Llasat, M. C., Herrera, S., Guti, J. M. (2017). Bias Correction and Downscaling of future RCM Precipitation Projections using a MOS-Analog Technique. *American Geophysical Union*.
- Van Der Schrier, G., Van Den Besselaar, E. J. M., Klein Tank, A. M. G., Verver, G. (2013). Monitoring European average temperature based on the E-OBS gridded data set. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 118(11), 5120-5135.
- Viner, D. (Climatic R. U. (2018). What is a GCM? Recuperado 5 de enero de 2019, a partir de [http://www.ipcc-data.org/guidelines/pages/gcm\\_guide.html](http://www.ipcc-data.org/guidelines/pages/gcm_guide.html)
- Wyllie, M. R. J. (1962). Relative permeability. En *Petroleum production handbook* (Vol. 2, pp. 1-14).
- Zhang, X., Feng, Y., Chan, R. (2018). Introduction to RClimDex v1 . 9, 1-26.

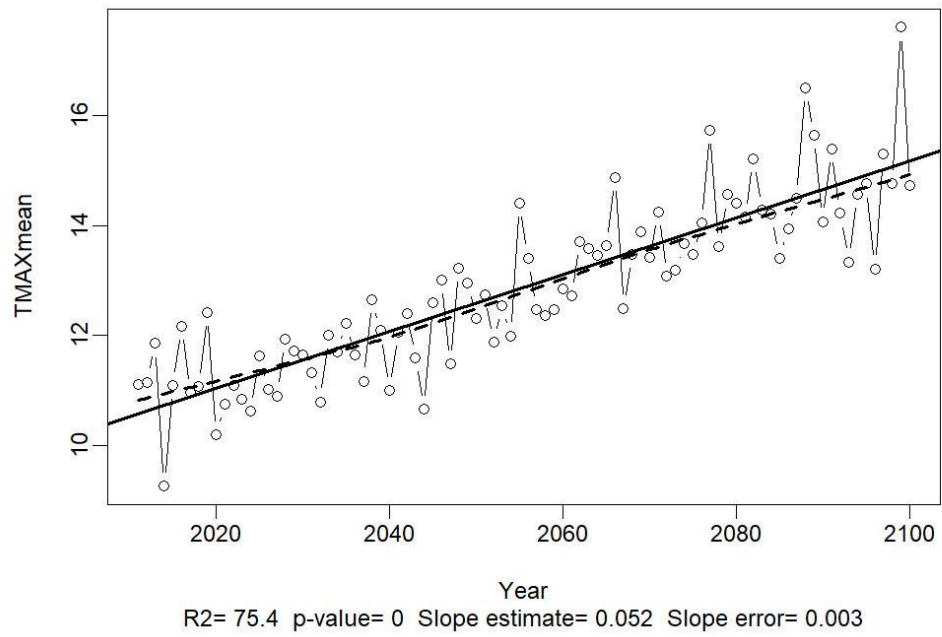
## Anexo 1. Índices de Cambio Climático



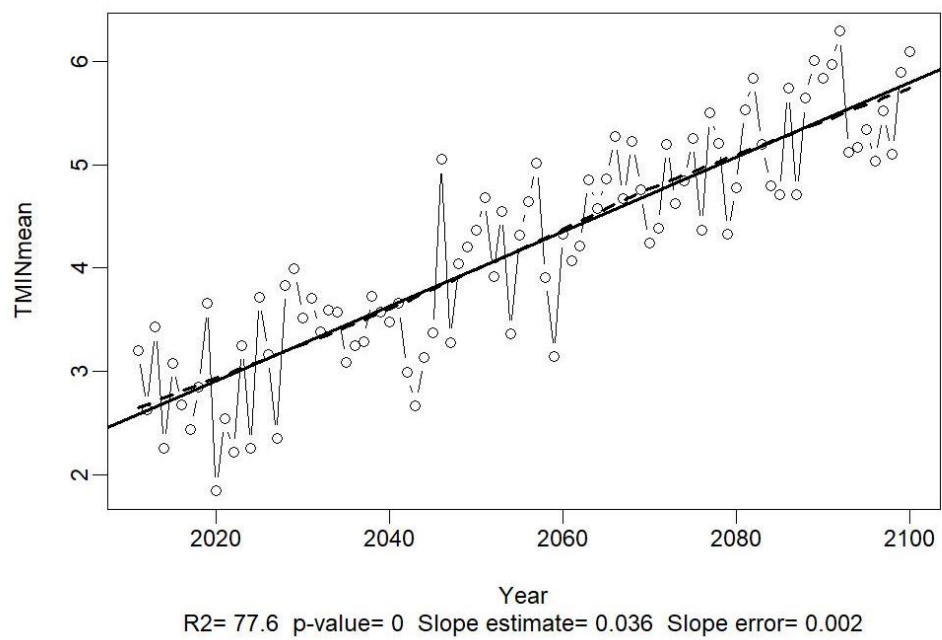
**Figura A 1.** Índice Temperatura máxima promedio 1961-2000



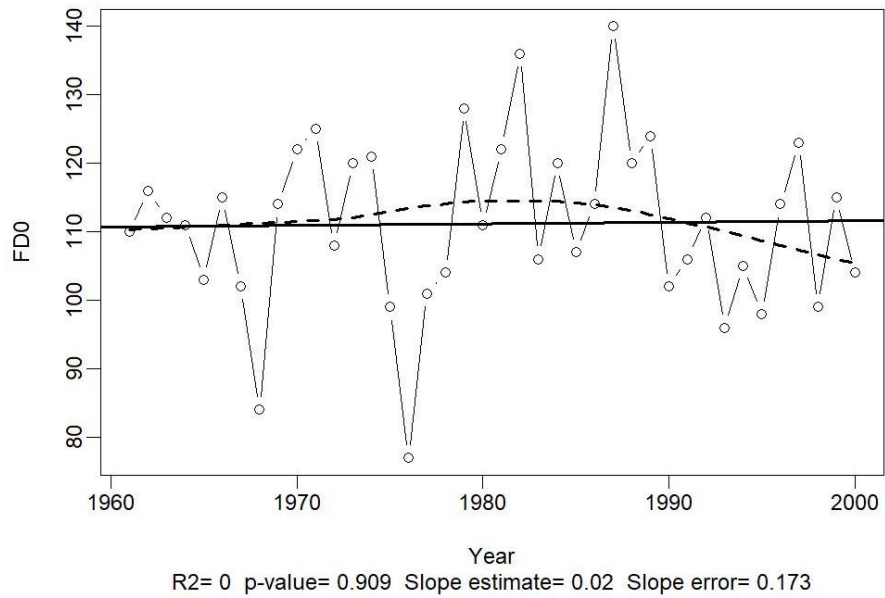
**Figura A 2.** Índice Temperatura mínima promedio 1961-2000



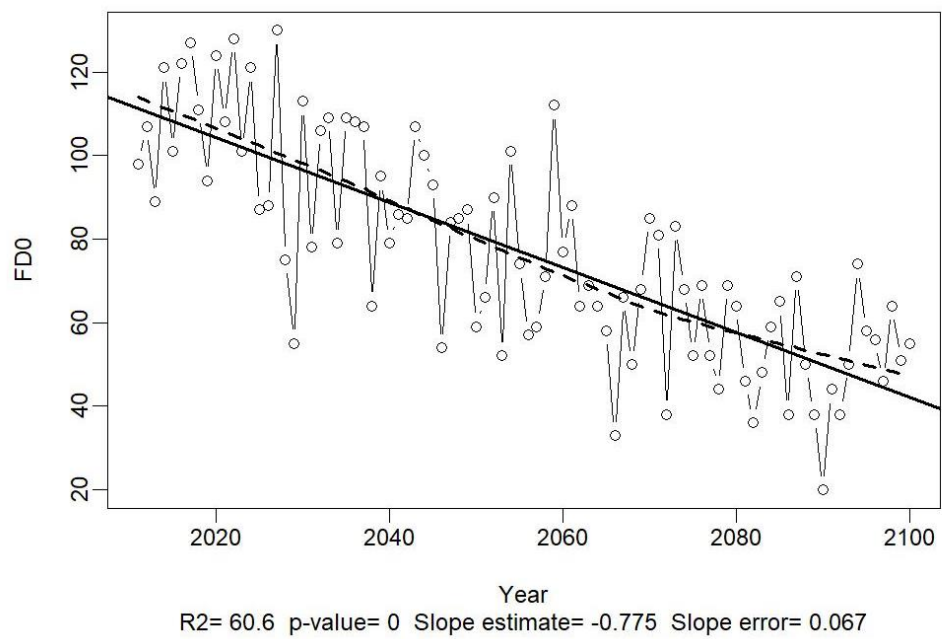
**Figura A 3.** Índice Temperatura máxima promedio 2011-2100



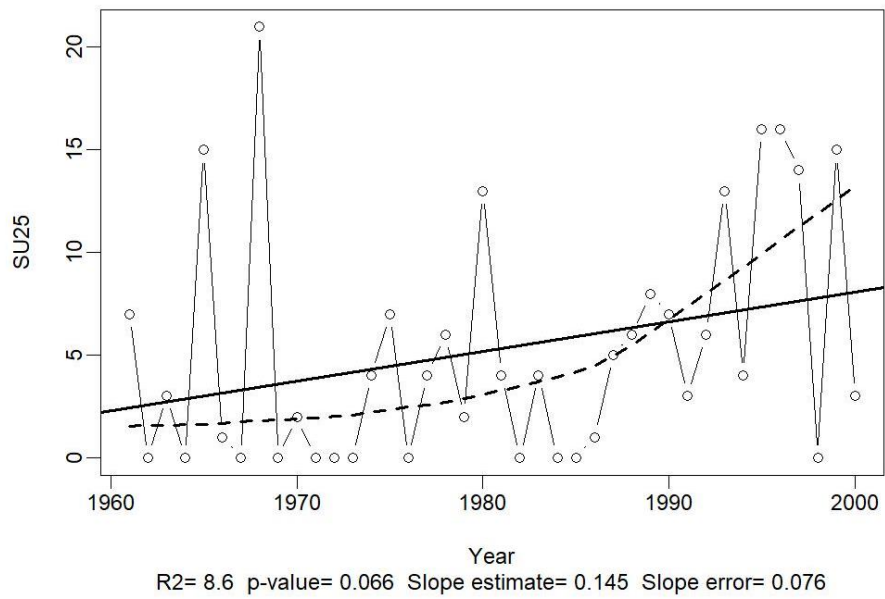
**Figura A 4.** Índice Temperatura mínima promedio 2011-2100



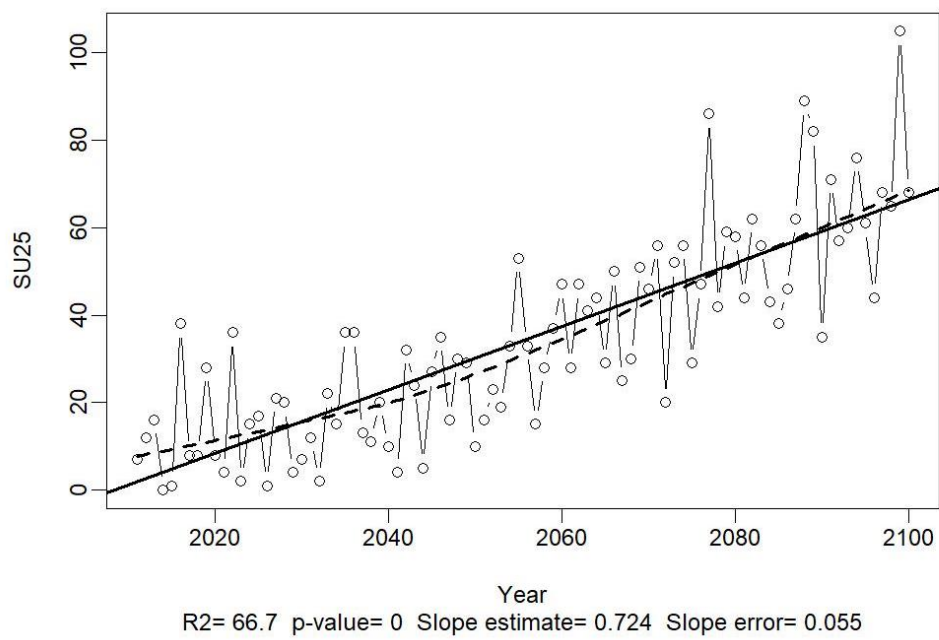
**Figura A 5.** Índice FD (número de días de heladas) 1961-2000



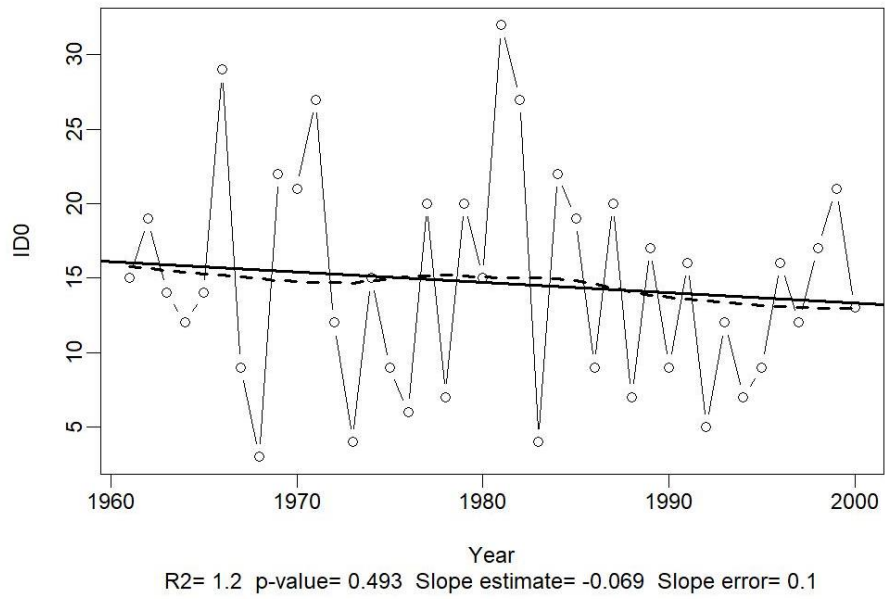
**Figura A 6.** Índice FD (número de días de heladas) 2011-2100



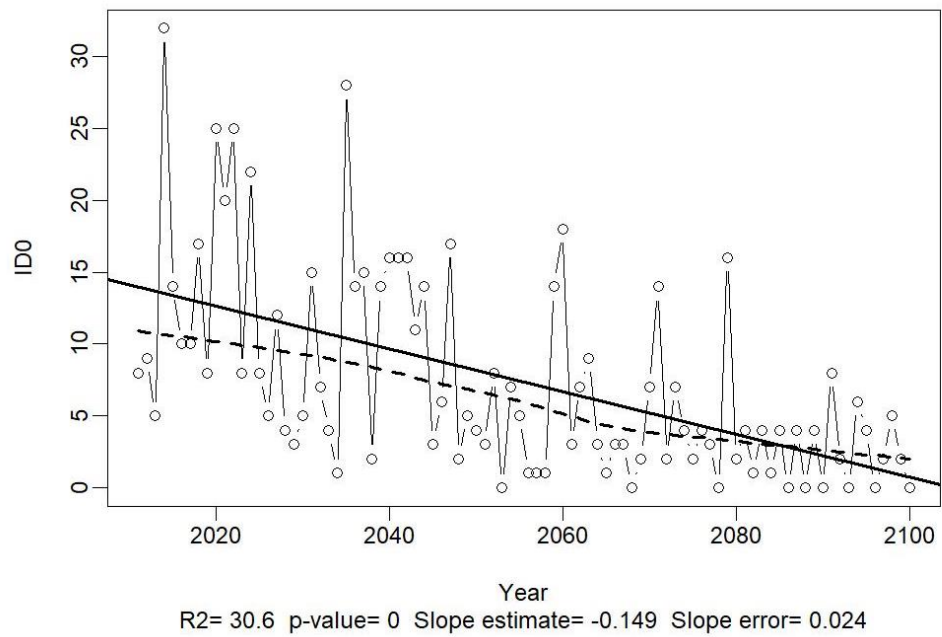
**Figura A 7.** Índice SU (número de días de verano) 1961-2000



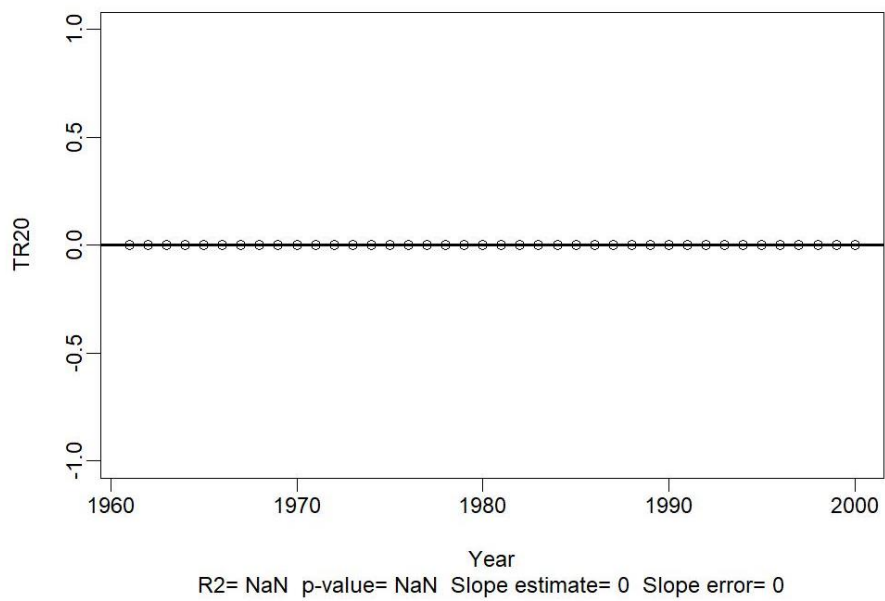
**Figura A 8.** Índice SU (número de días de verano) 2011-2100



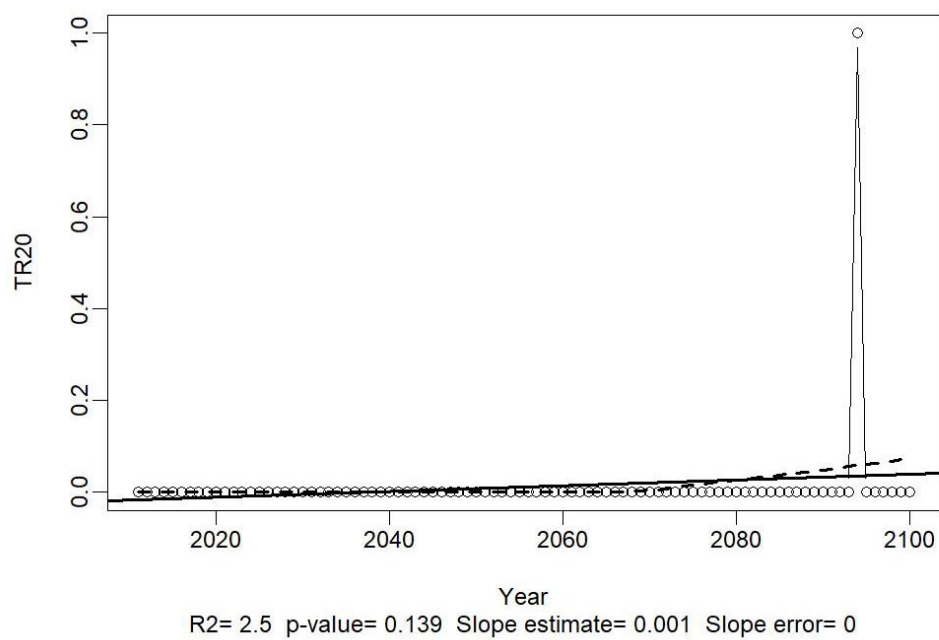
**Figura A 9.** Índice ID (número de días de congelación) 1961-2000



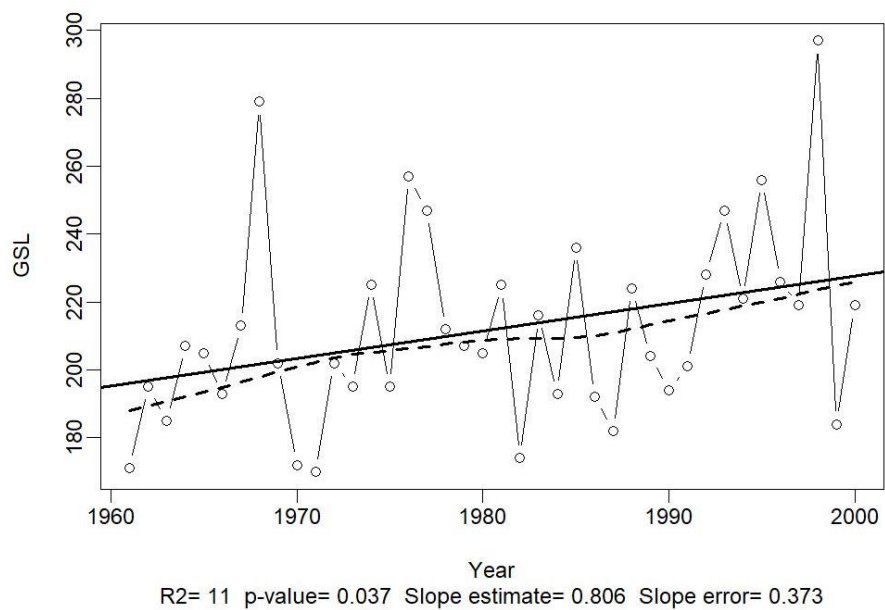
**Figura A 10.** Índice ID (número de días de congelación) 2011-2100



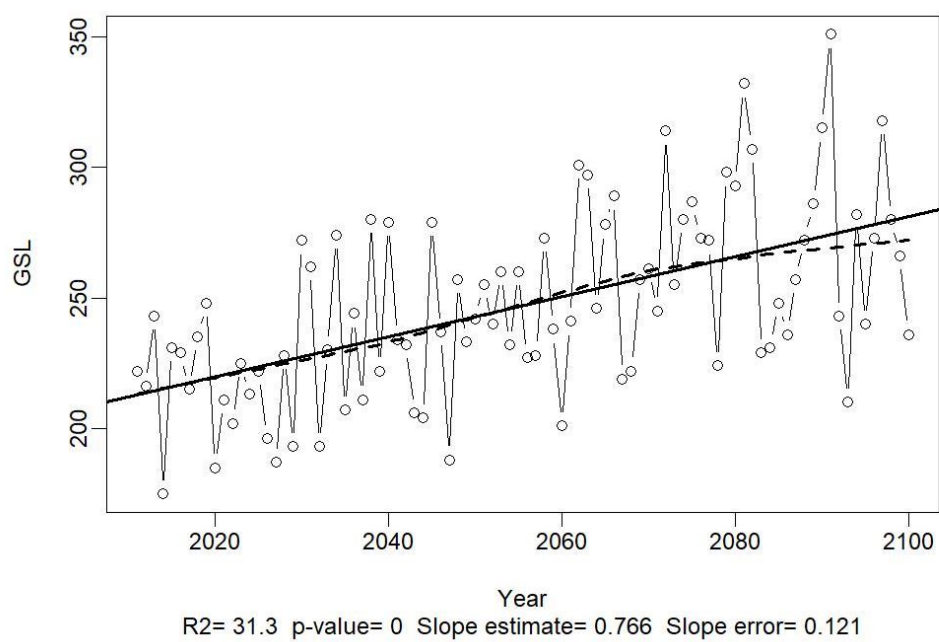
**Figura A 11.** Índice TR (número de noches tropicales) 1961-2000



**Figura A 12.** Índice TR (número de noches tropicales) 2011-2100

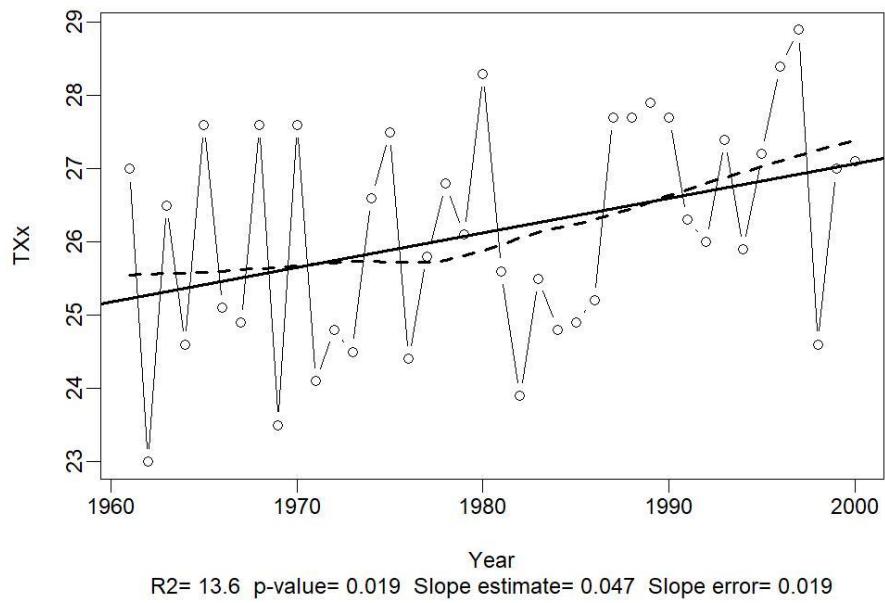


**Figura A 13.** Índice GSL (temporada de crecimiento) 1961-2000

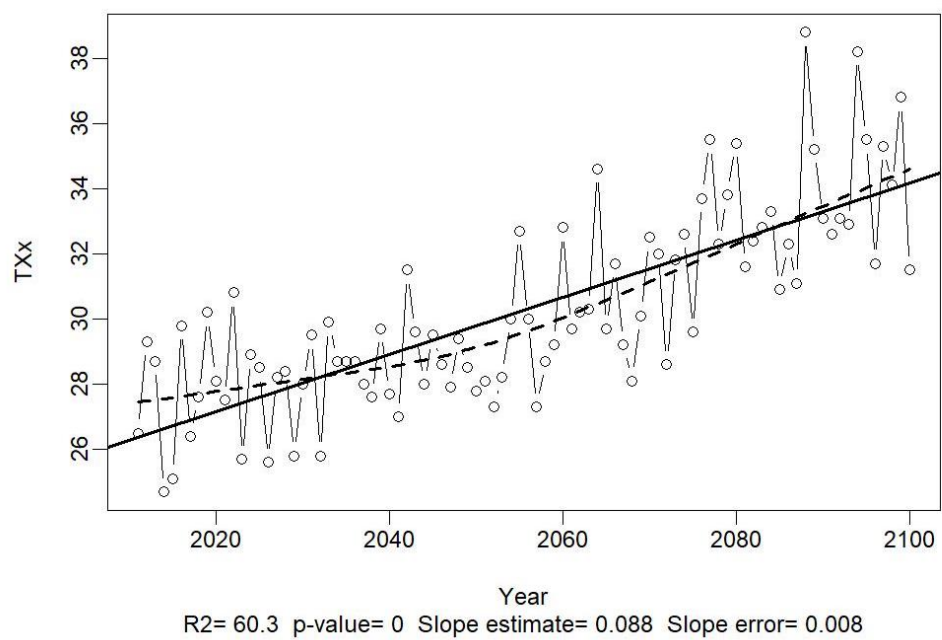


**Figura A 14.** Índice GSL (Temporada de crecimiento) 2011-2100

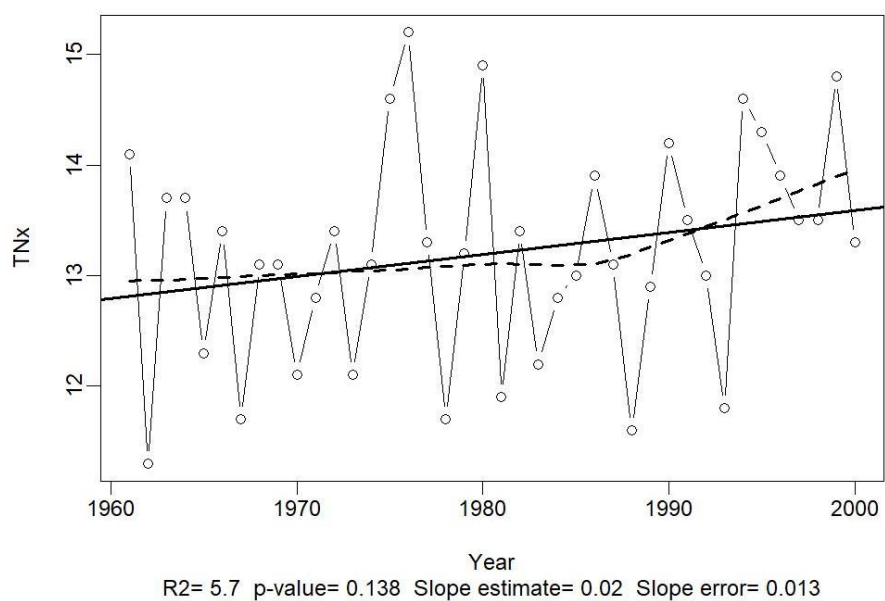




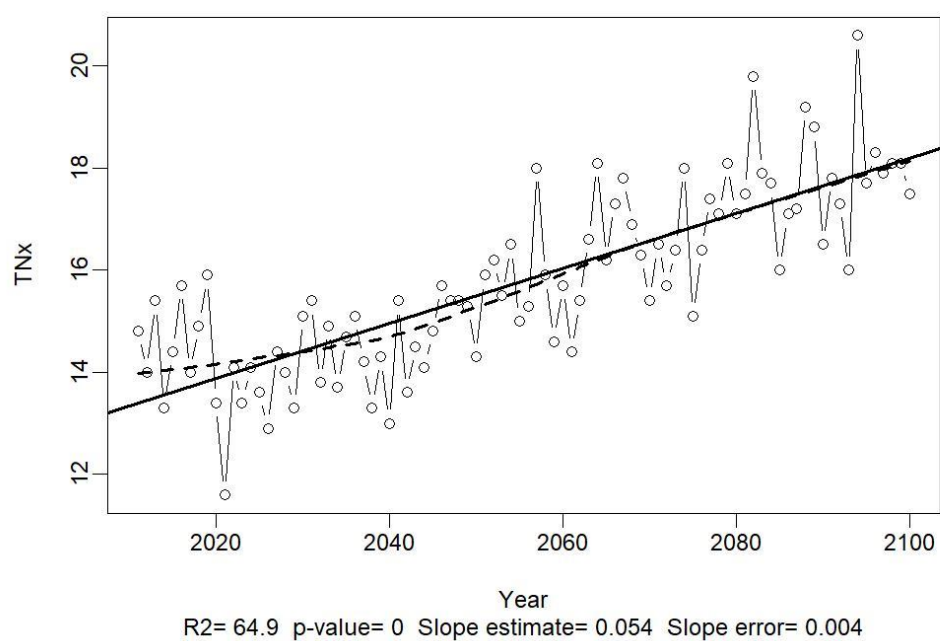
**Figura A 15.** Índice TXx (máximas diarias) 1961-2000



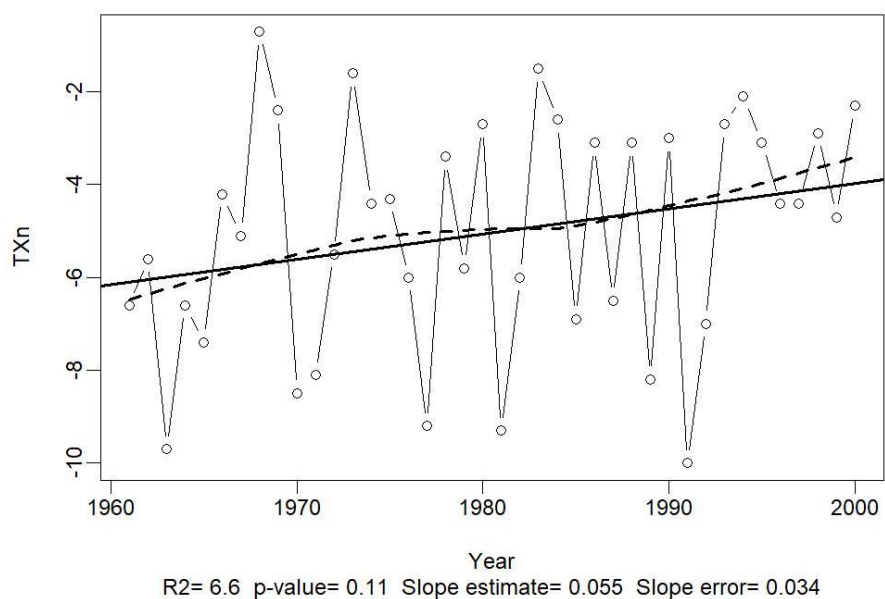
**Figura A 16.** Índice TXx (máximas diarias) 2011-2100



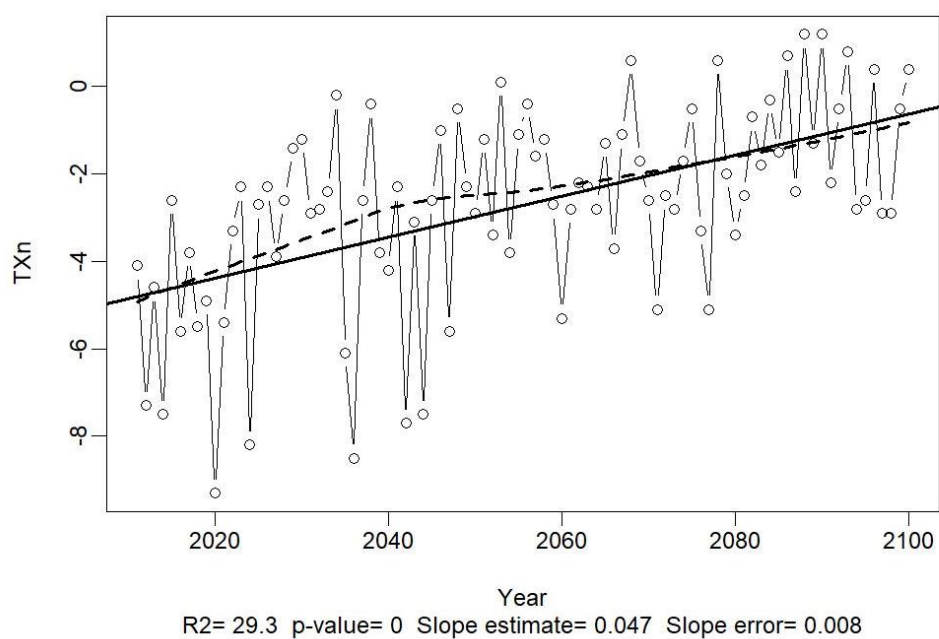
**Figura A 17.** Índice TNx (máximas diarias) 1961-2000



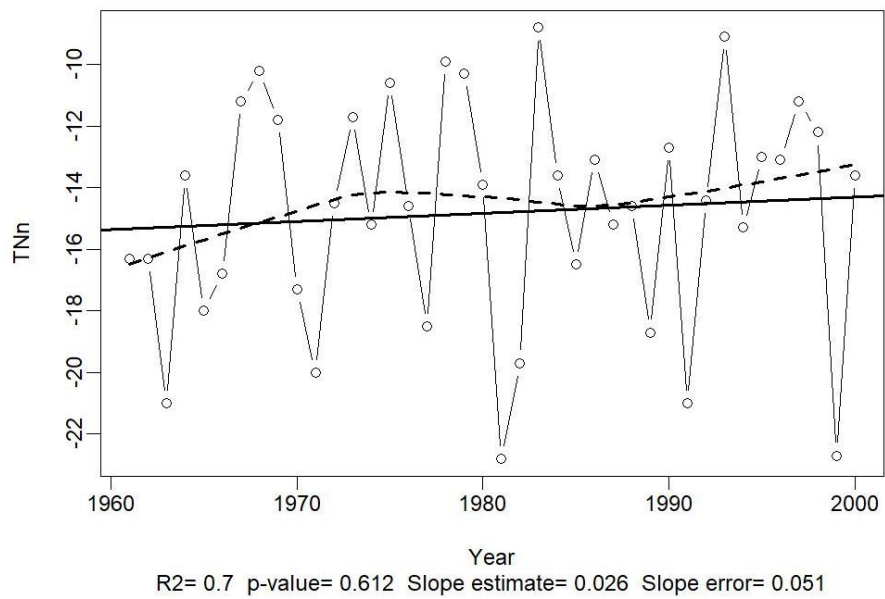
**Figura A 18.** Índice TNx (máximas diarias) 2011-2100



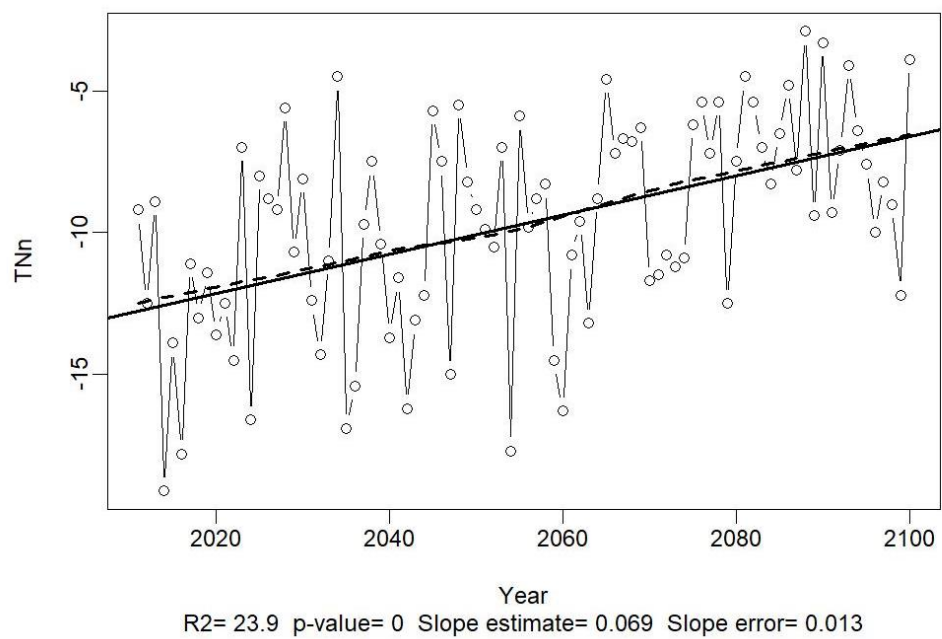
**Figura A 19.** Índice TXn (mínimas diarias) 1961-2000



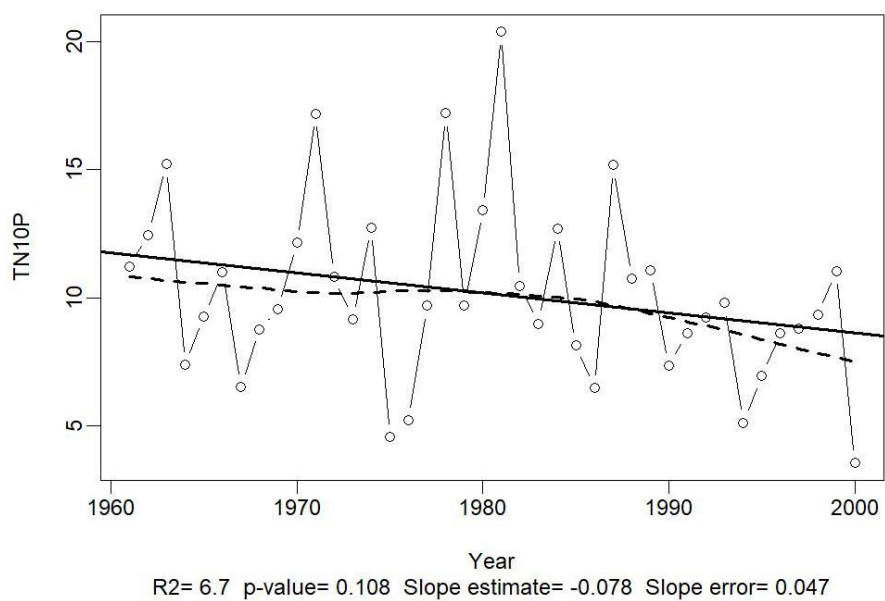
**Figura A 20.** Índice TXn (mínimas diarias) 2011-2100



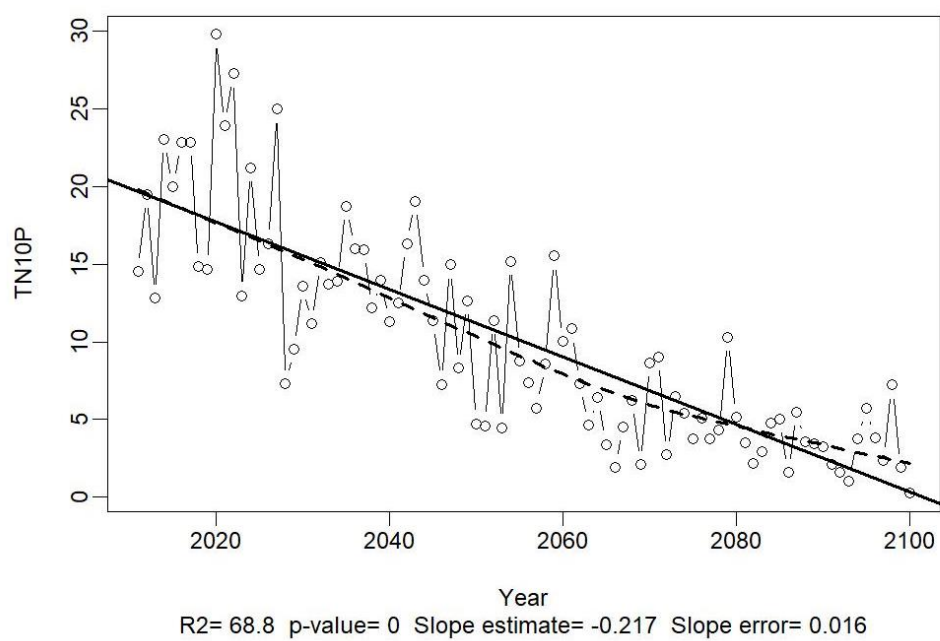
**Figura A 21.** Índice TNn (mínimas diarias) 1961-2000



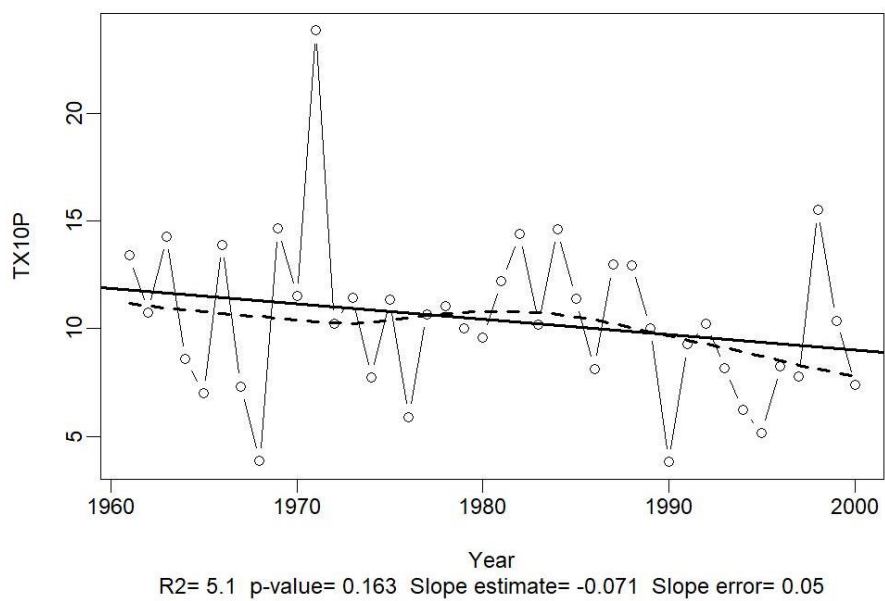
**Figura A 22.** Índice TNn (mínimas diarias) 2011-2100



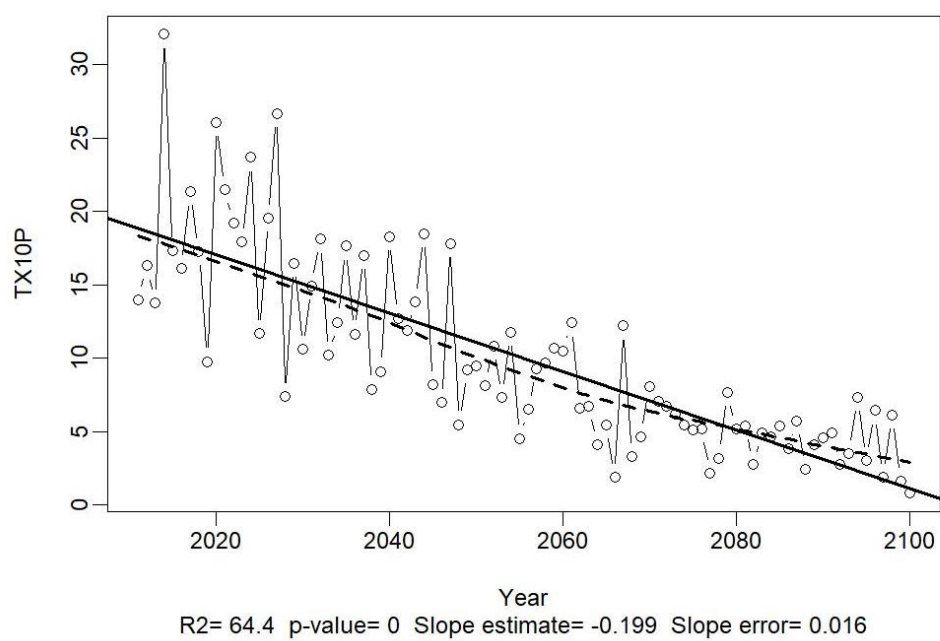
**Figura A 23.** Índice TN10p 1961-2000



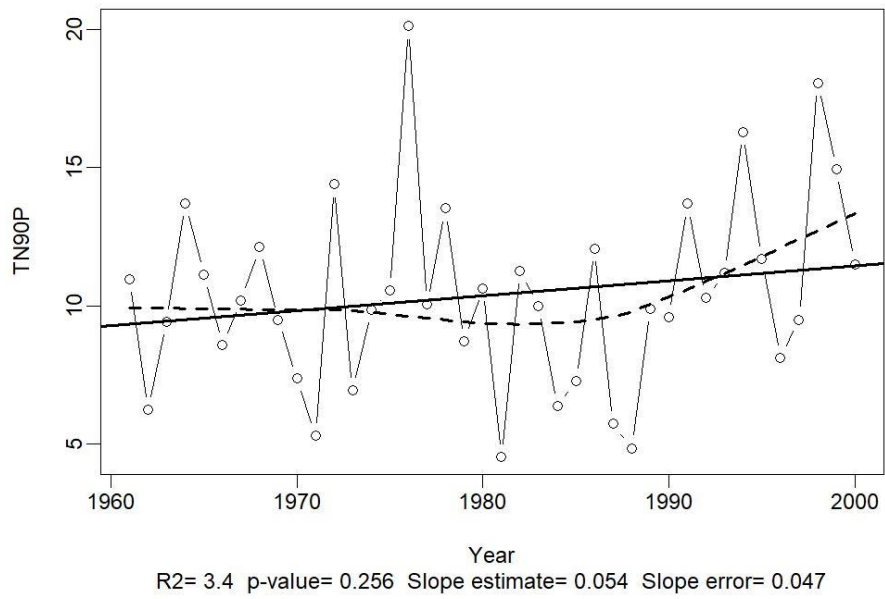
**Figura A 24.** Índice TN10p 2011-2100



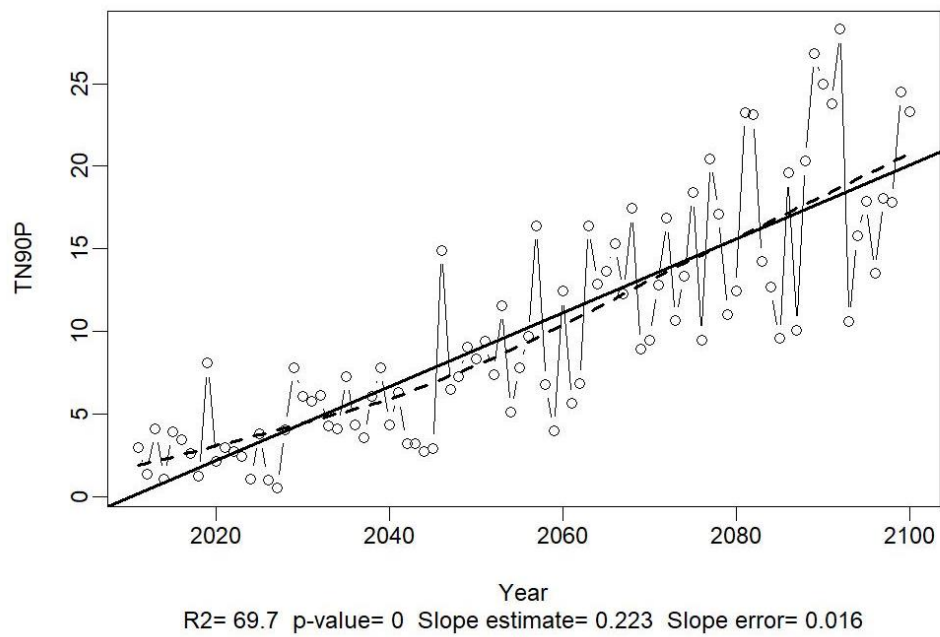
**Figura A 25.** Índice TX10p 1961-2000



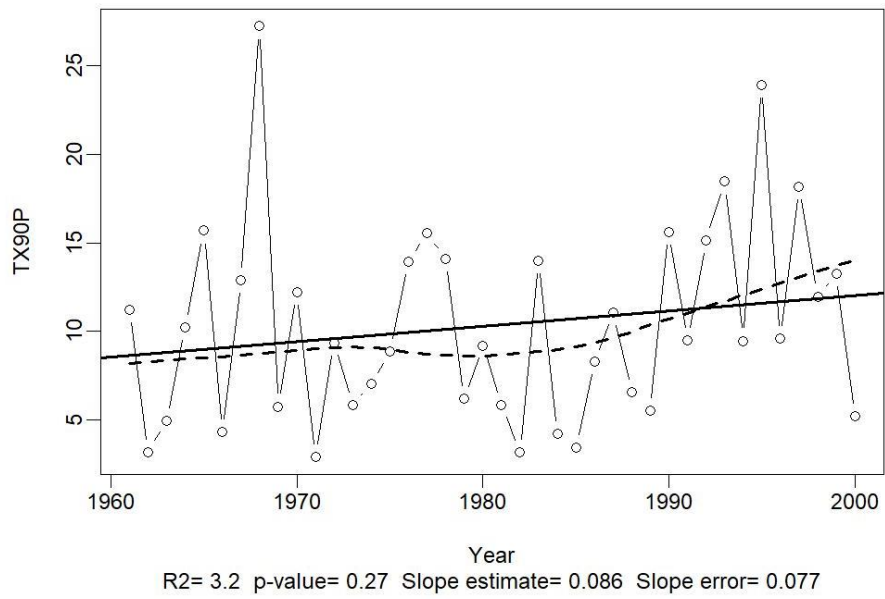
**Figura A 26.** Índice TX10p 2011-2100



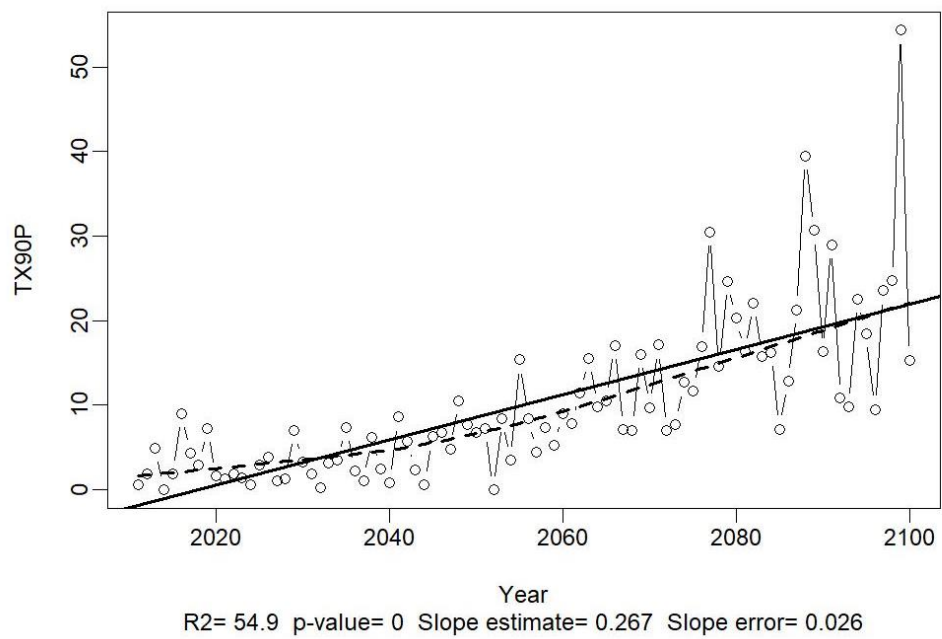
**Figura A 27.** Índice TN90p 1961-2000



**Figura A 28.** Índice TN90p 2011-2100

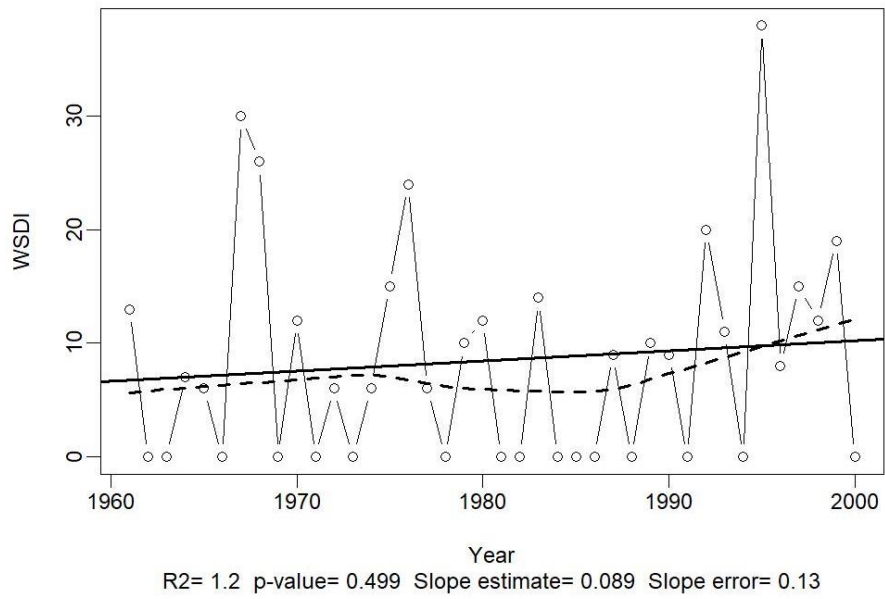


**Figura A 29.** Índice TX90p 1961-2000

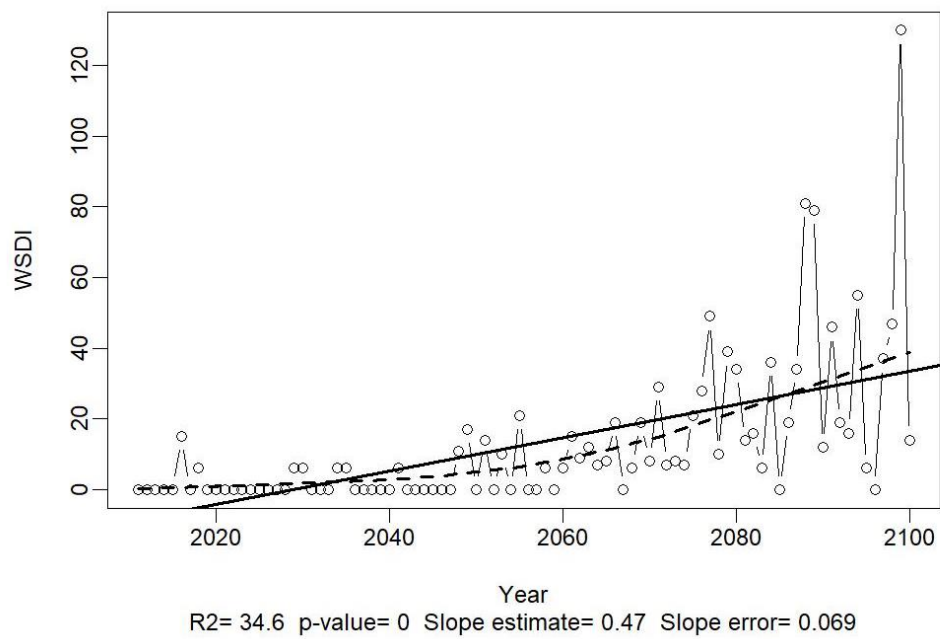


**Figura A 30.** Índice TX90p 2011-2100

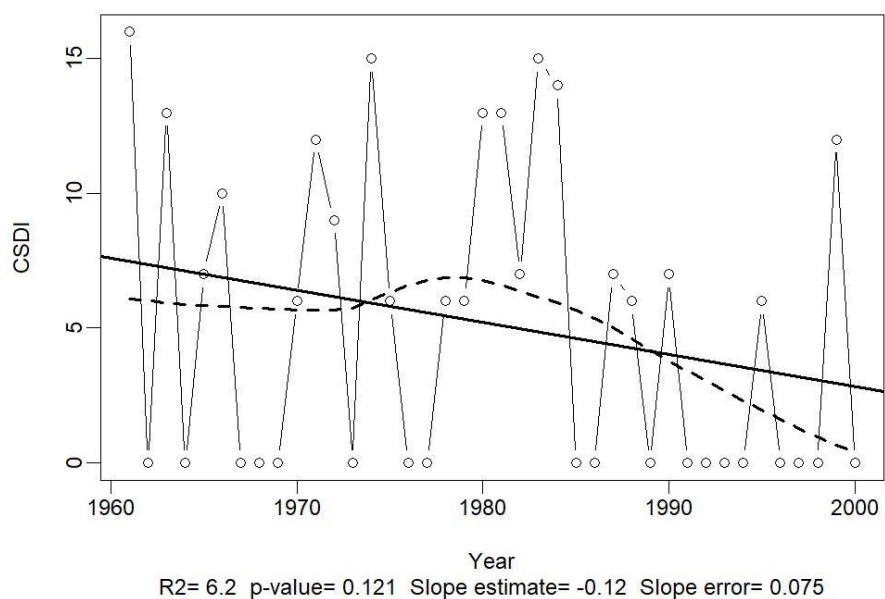




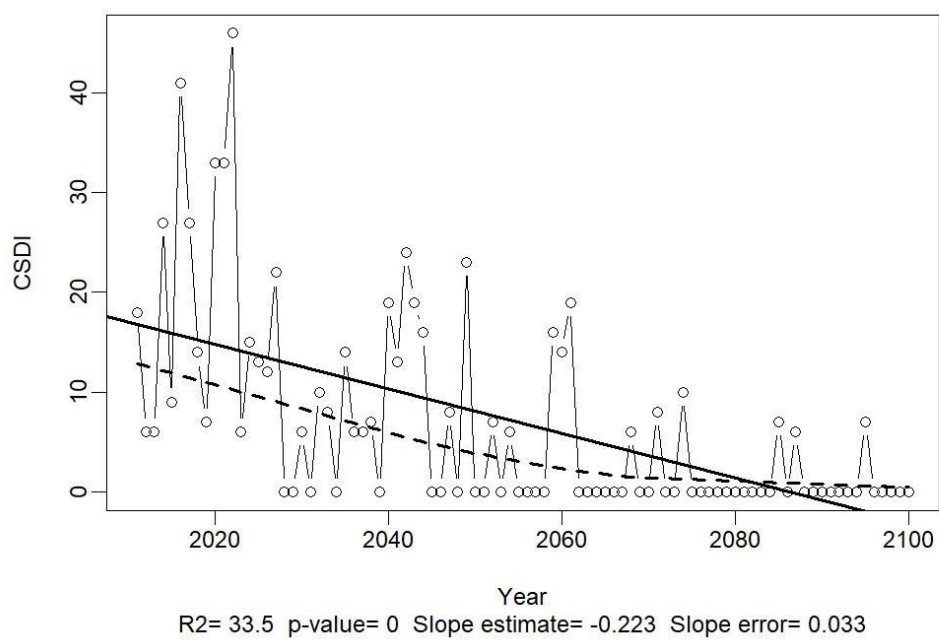
**Figura A 31.** Índice WSDI (olas de calor) 1961-2000



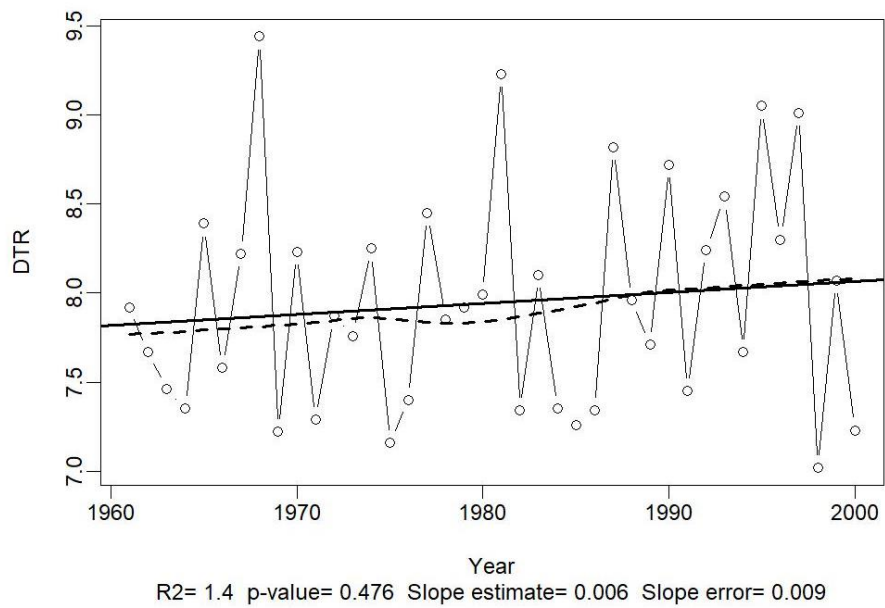
**Figura A 32.** Índice WSDI (olas de calor) 2011-2100



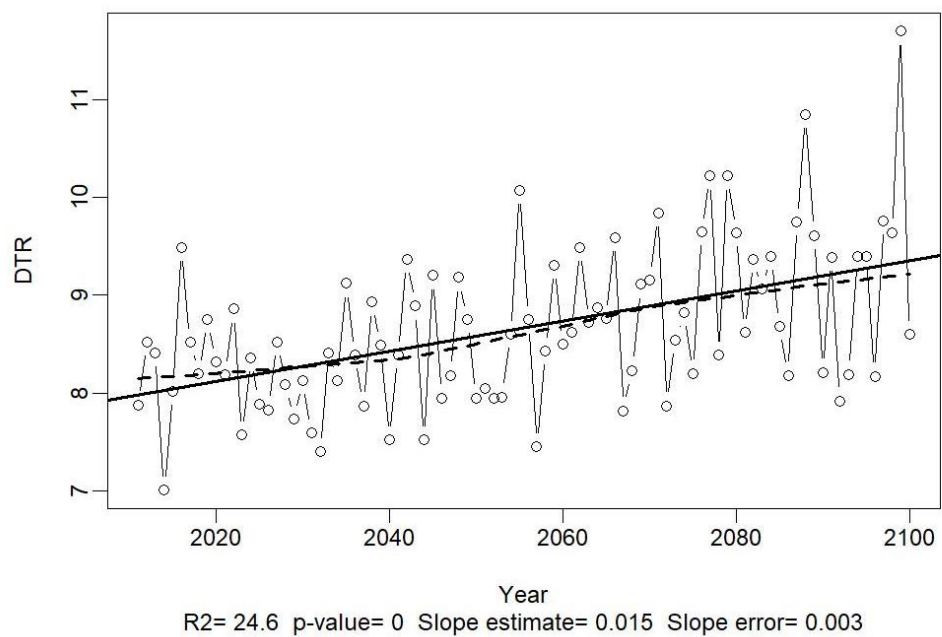
**Figura A 33.** Índice CSDI (fríos extremos) 1961-2000



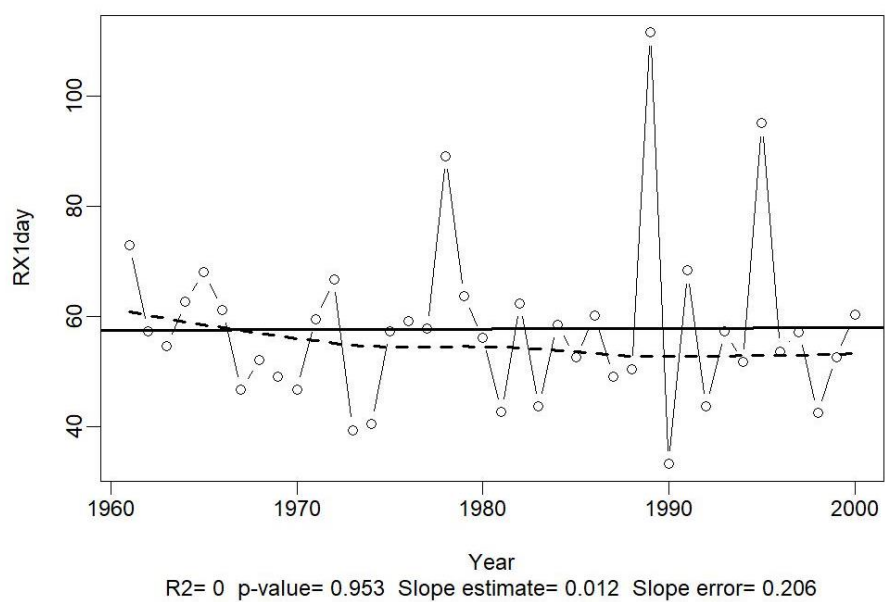
**Figura A 34.** Índice CSDI (fríos extremos) 2011-2100



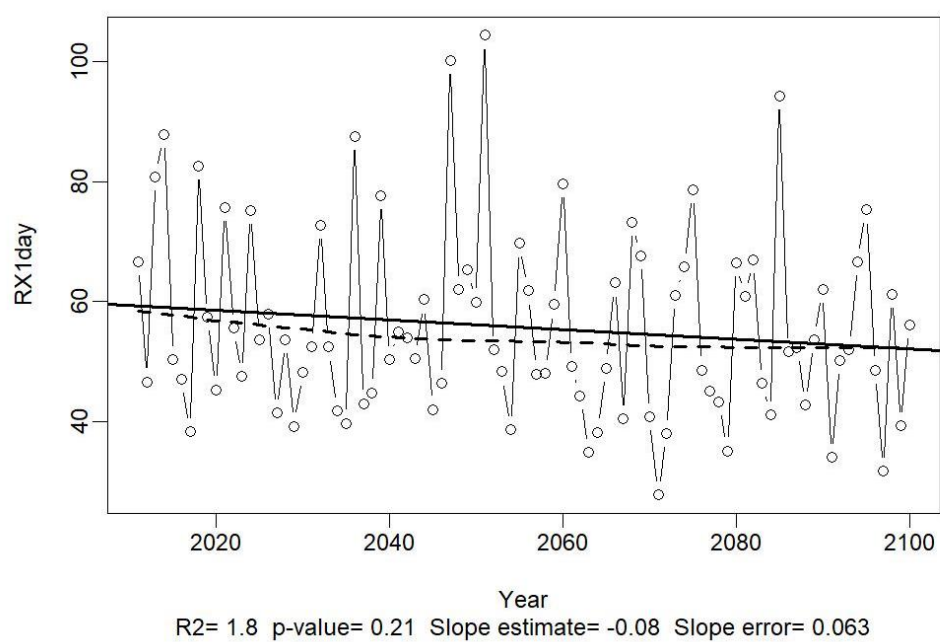
**Figura A 35.** Índice DTR (diferencia mensual) 1961-2000



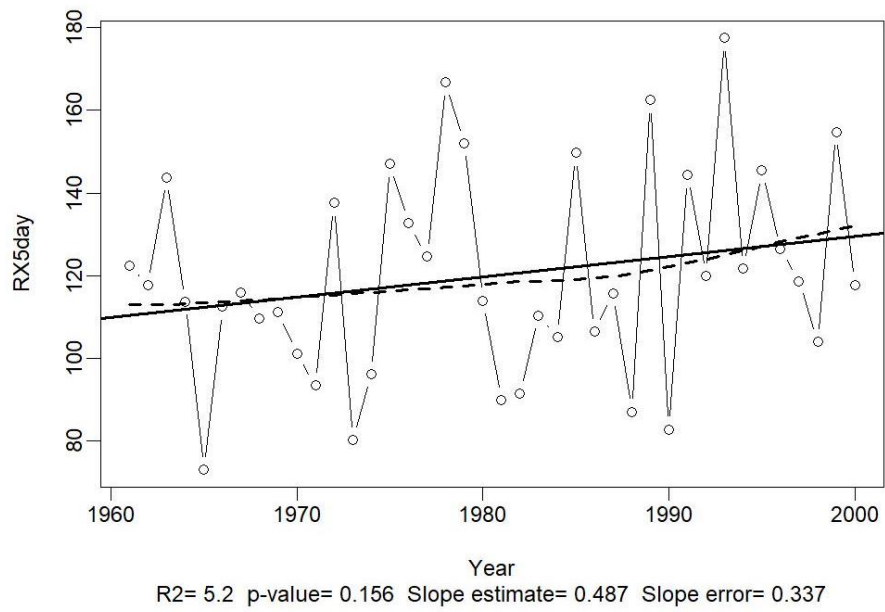
**Figura A 36.** Índice DTR (diferencia mensual) 2011-2100



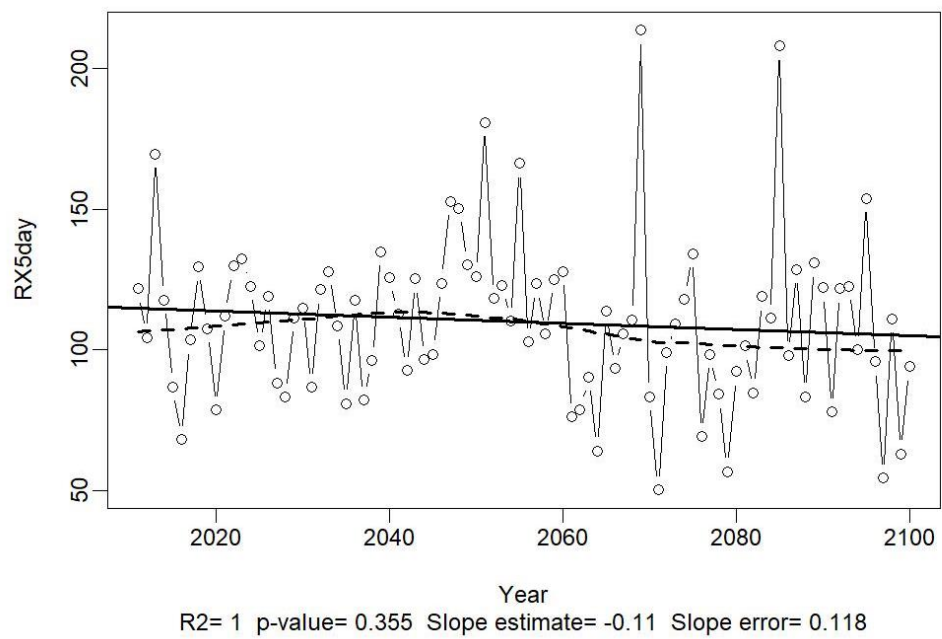
**Figura A 37. Índice RX1 1961-2000**



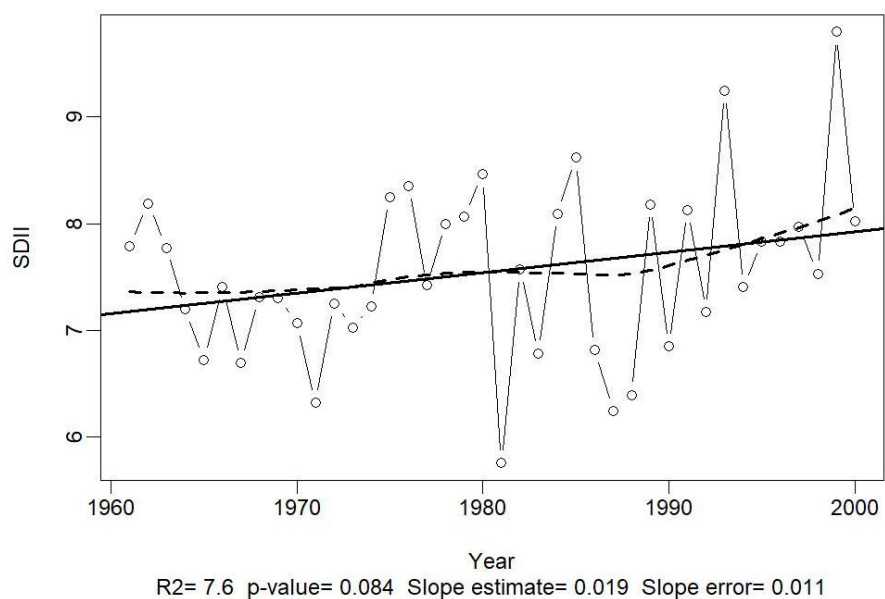
**Figura A 38. Índice RX1 2011-2100**



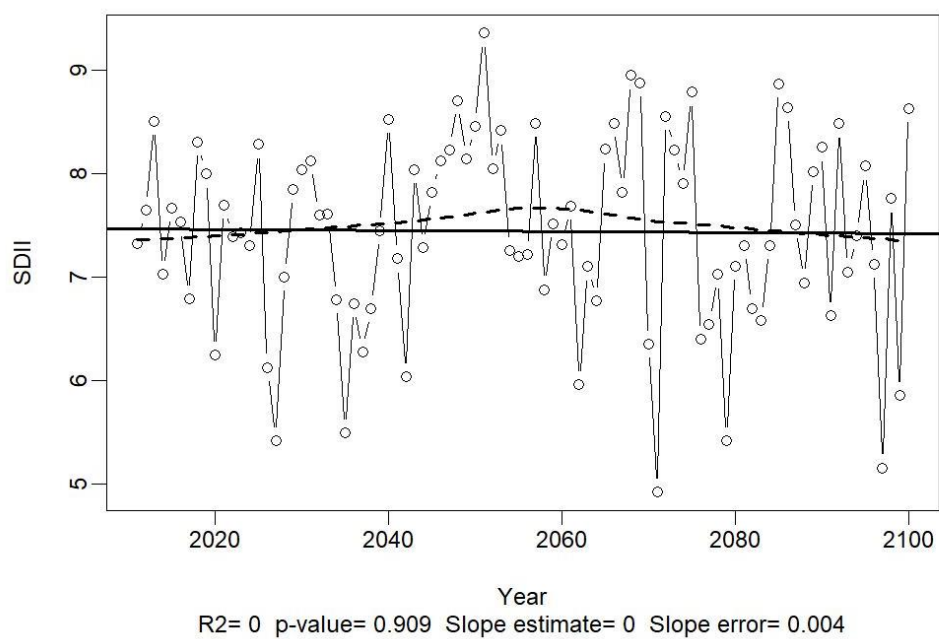
**Figura A 39. Índice RX5 1961-2000**



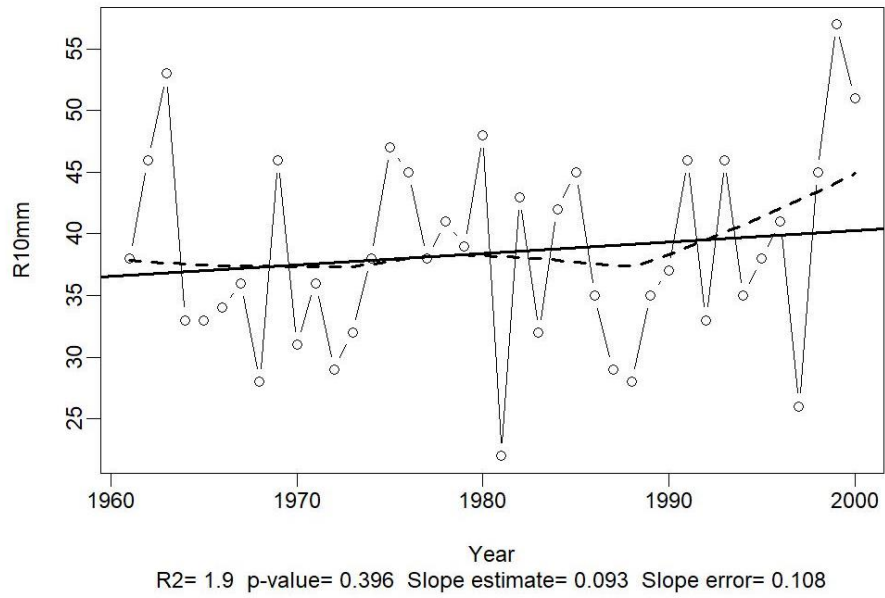
**Figura A 40. Índice RX5 2011-2100**



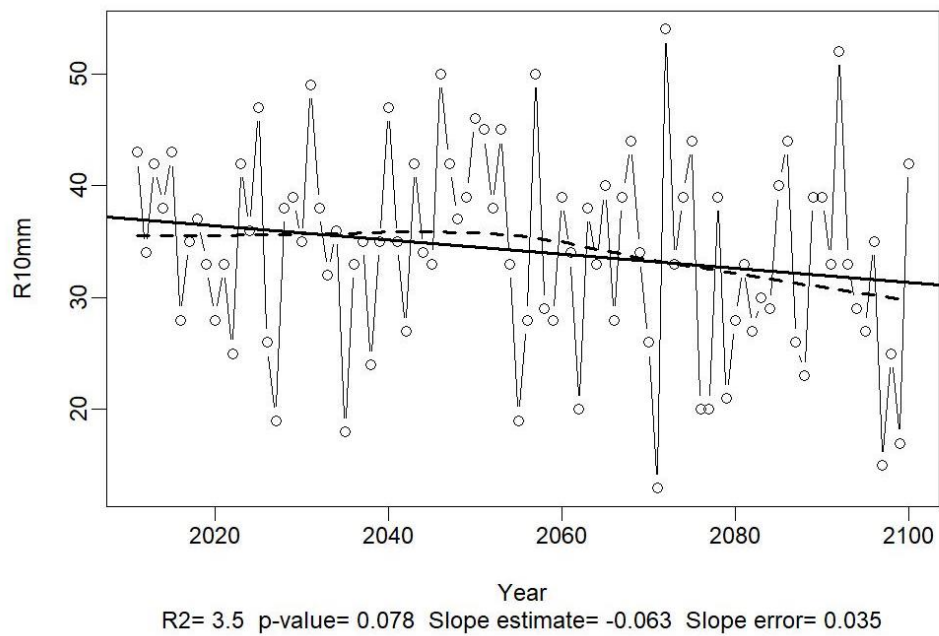
**Figura A 41.** Índice SDII (precipitación simple) 1961-2000



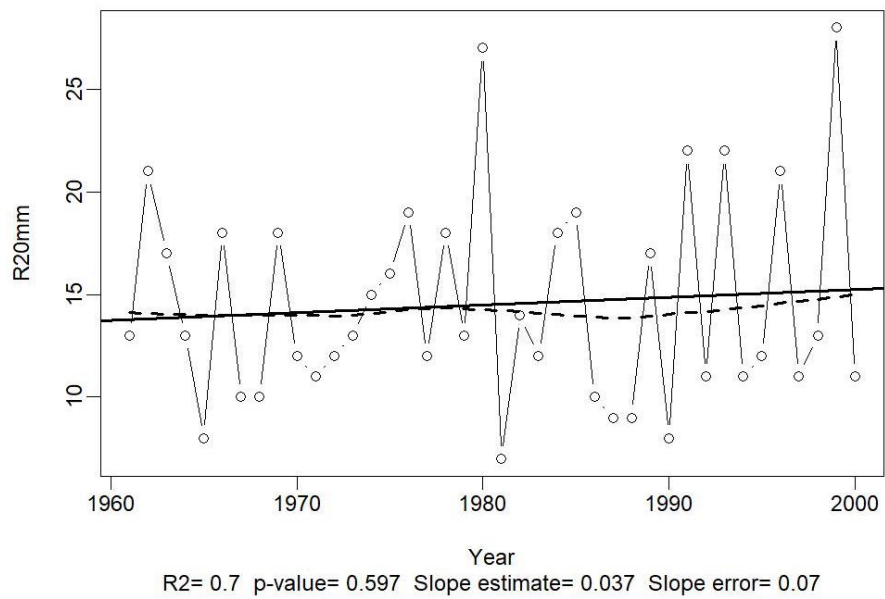
**Figura A 42.** Índice SDII (precipitación simple) 2011-2100



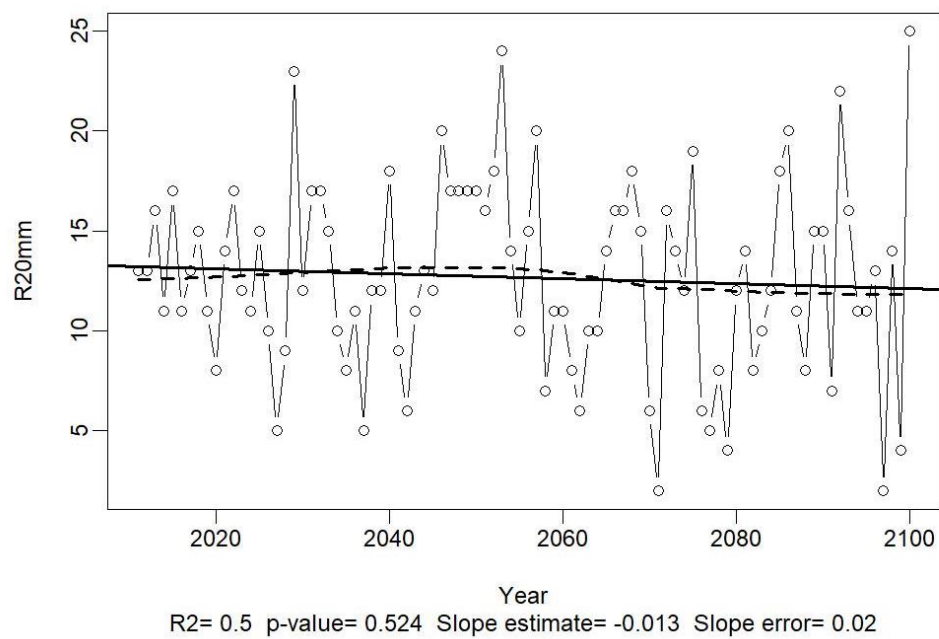
**Figura A 43.** Índice R10 1961-2000



**Figura A 44.** Índice R10 2011-2100

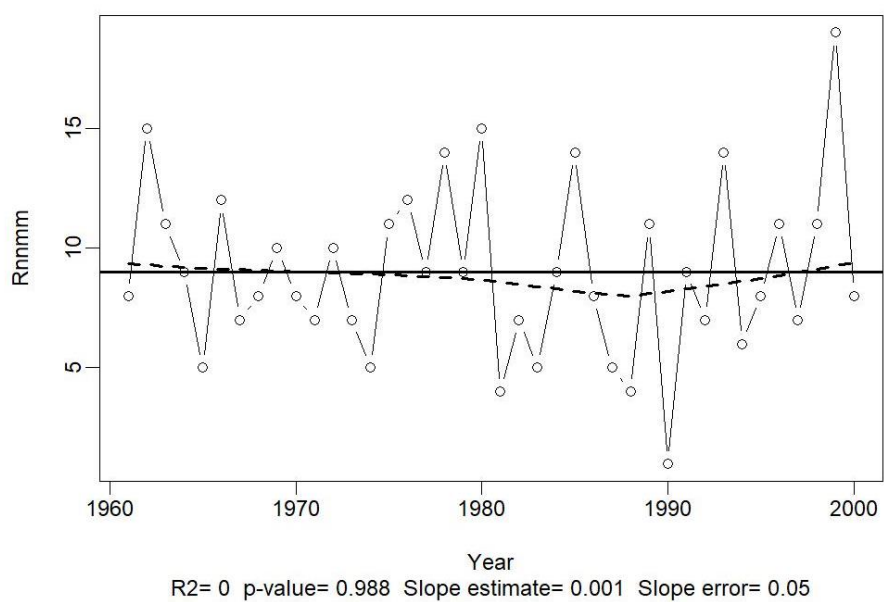


**Figura A 45.** Índice R20 1961-2000

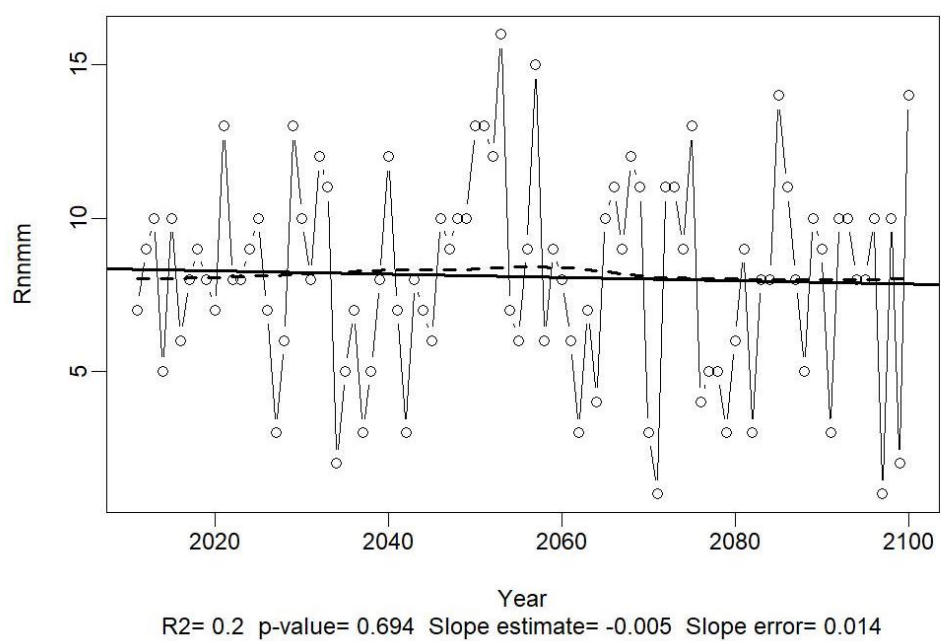


**Figura A 46.** Índice R20 2011-2100

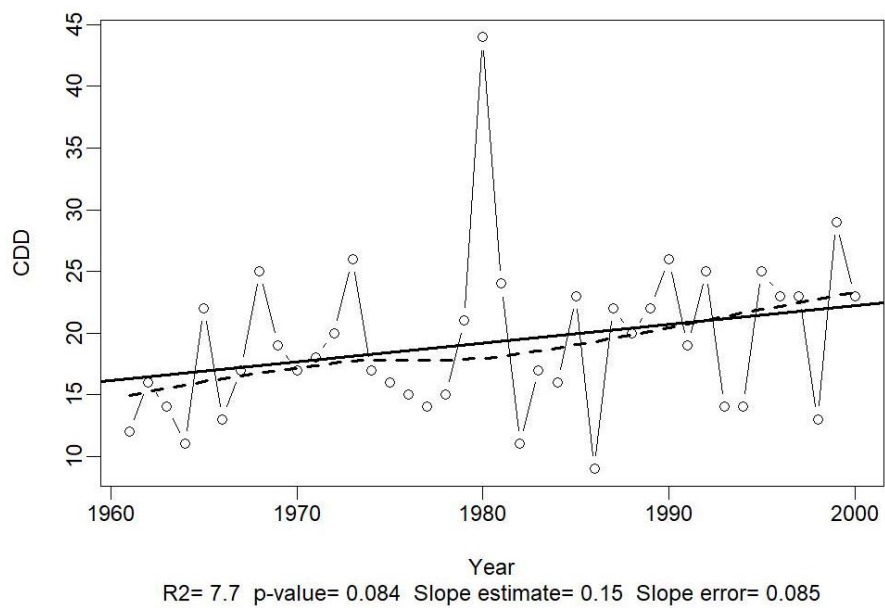




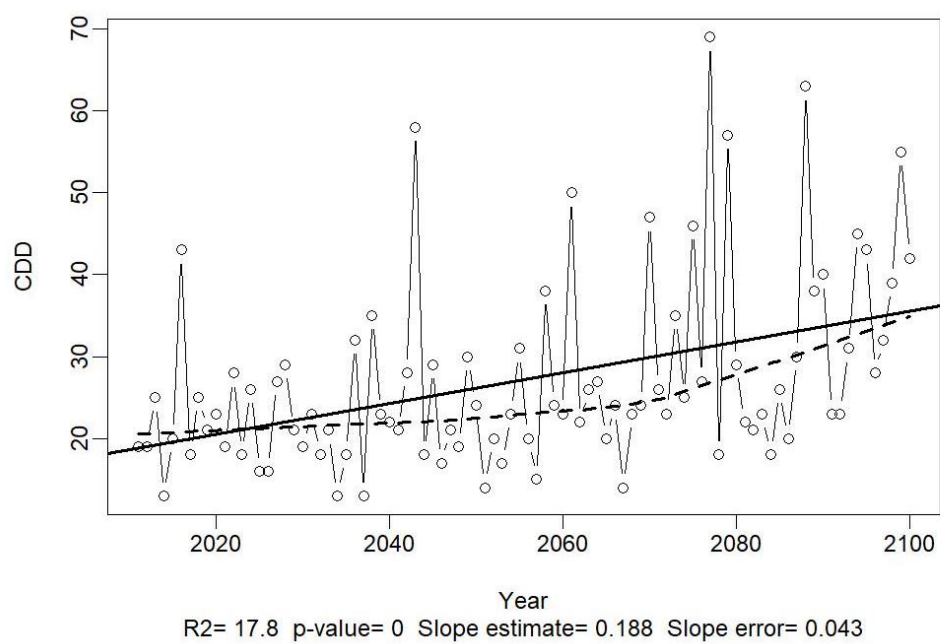
**Figura A 47.** Índice R25 1961-2000



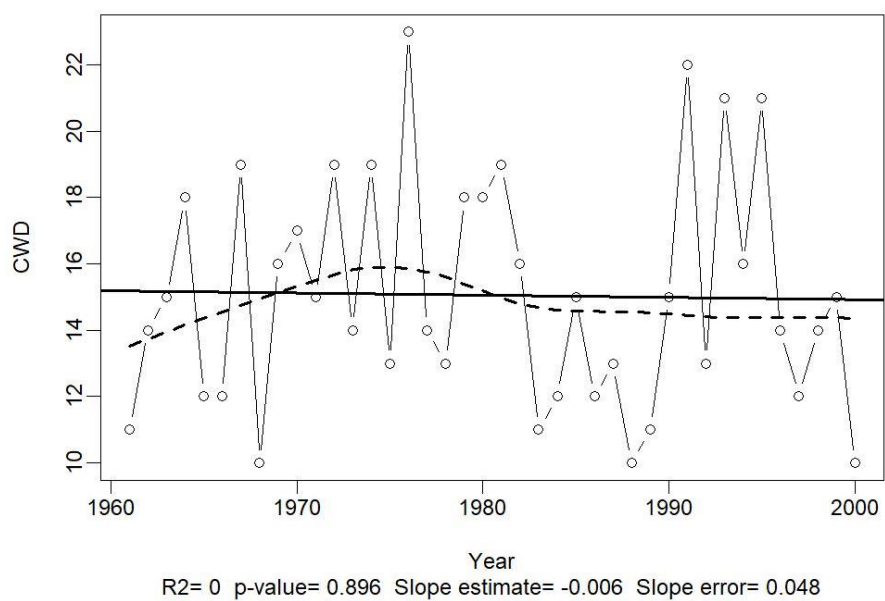
**Figura A 48.** Índice R25 2011-2100



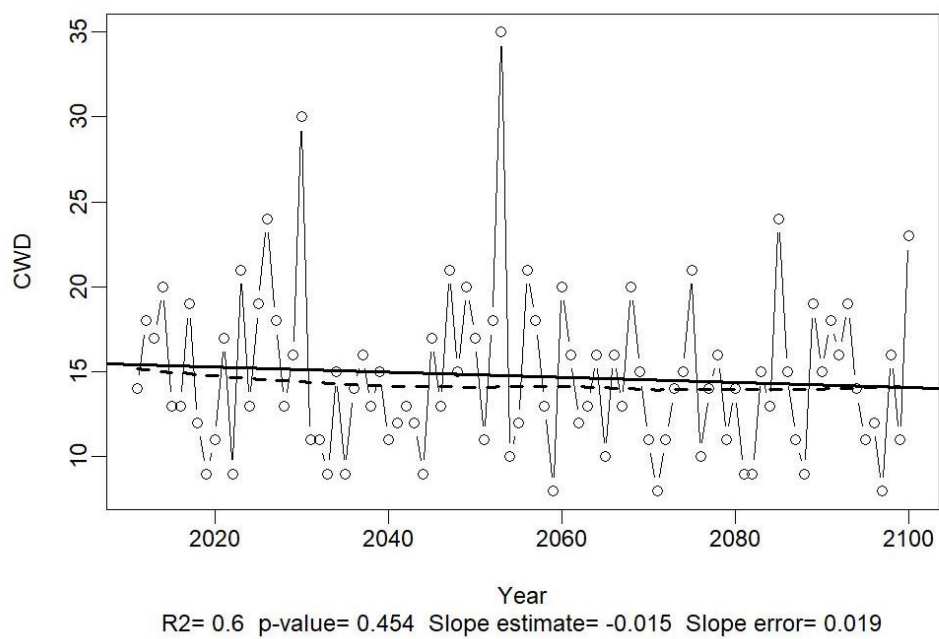
**Figura A 49.** Índice DDC (temporada seca) 1961-2000



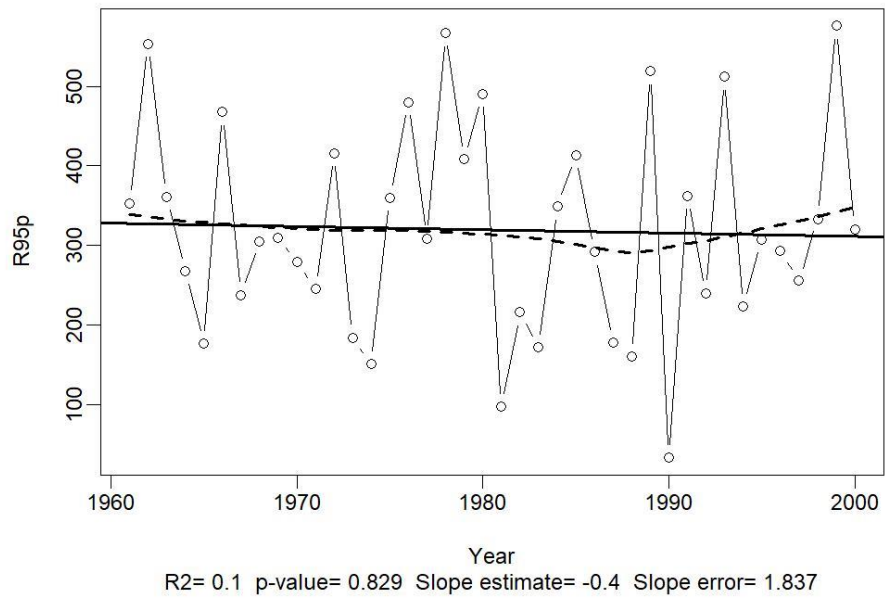
**Figura A 50.** Índice DDC (temporada seca) 2011-2100



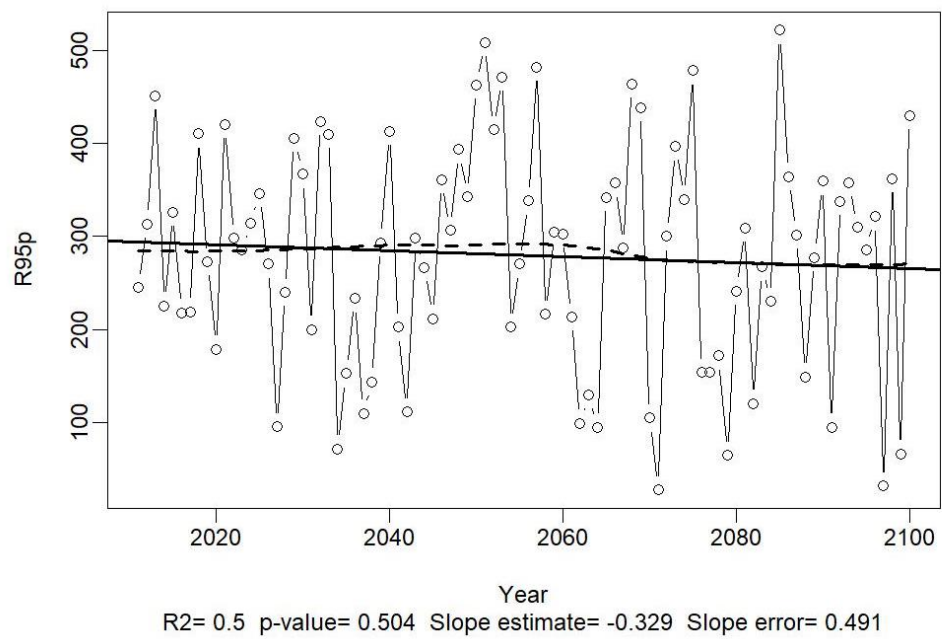
**Figura A 51.** Índice CWD (temporada húmeda) 1961-2000



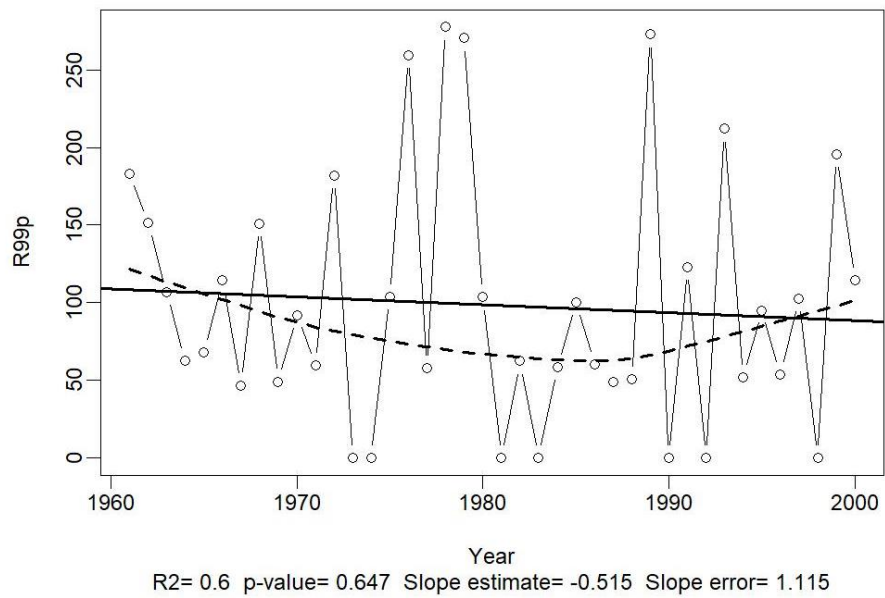
**Figura A 52.** Índice CWD (temporada húmeda) 2011-2100



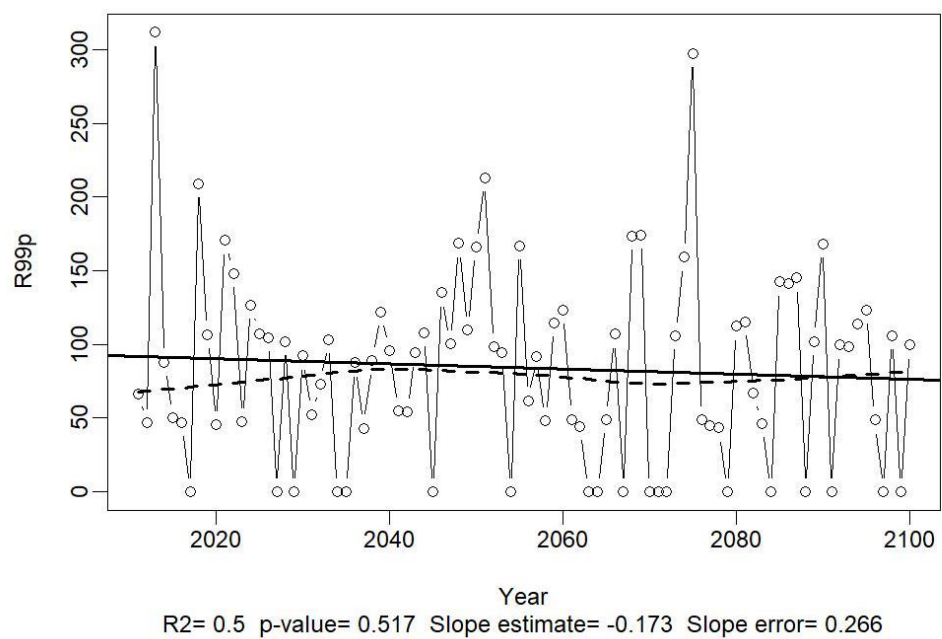
**Figura A 53.** Índice R95pTOT 1961-2000



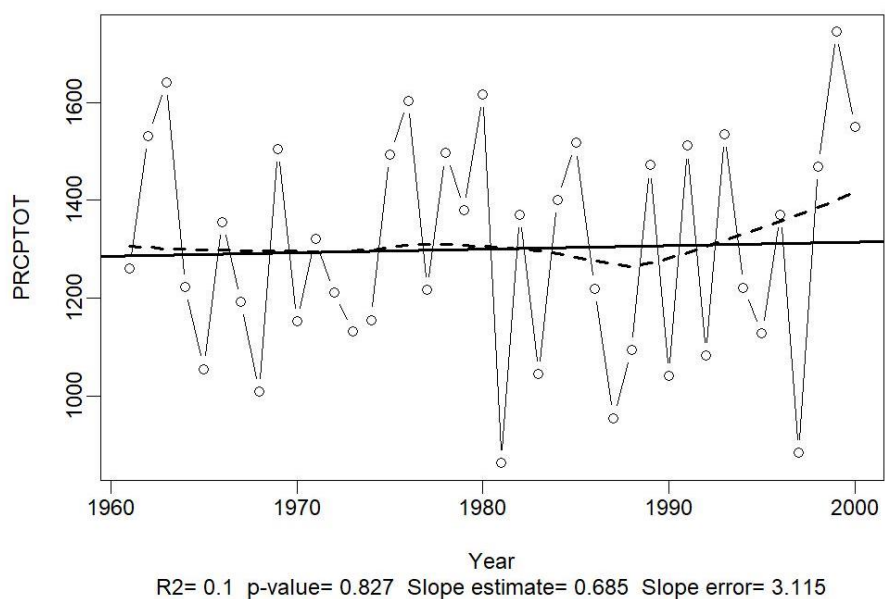
**Figura A 54.** Índice R95pTOT 2011-2100



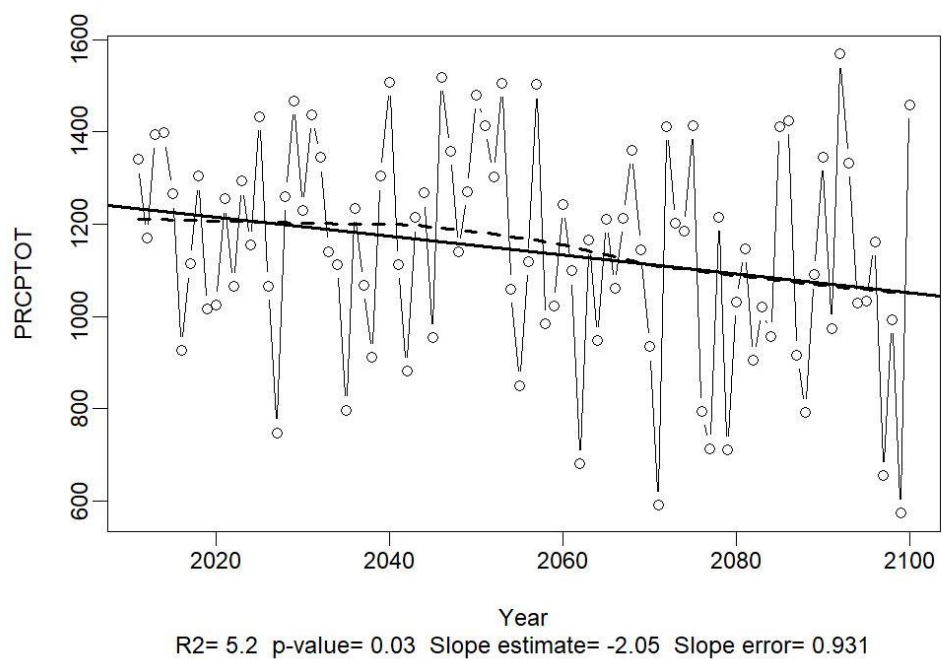
**Figura A 55.** Índice R99pTOT 1961-2000



**Figura A 56.** Índice R99pTOT 2011-2100



**Figura A 57. Índice PRCPTOT 1961-2000**

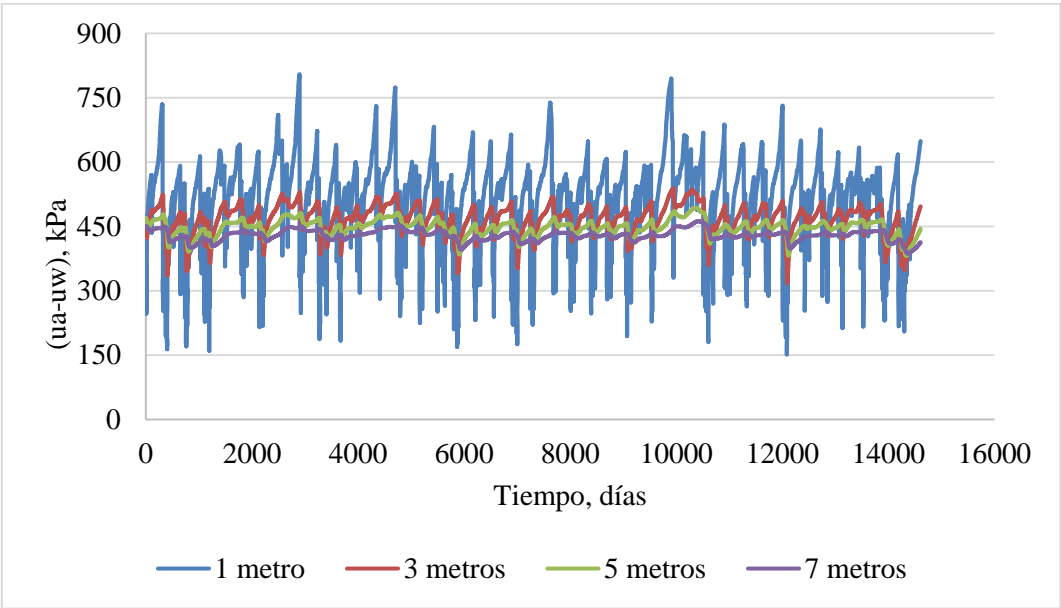


**Figura A 58. Índice PRCPTOT 2011-2100**

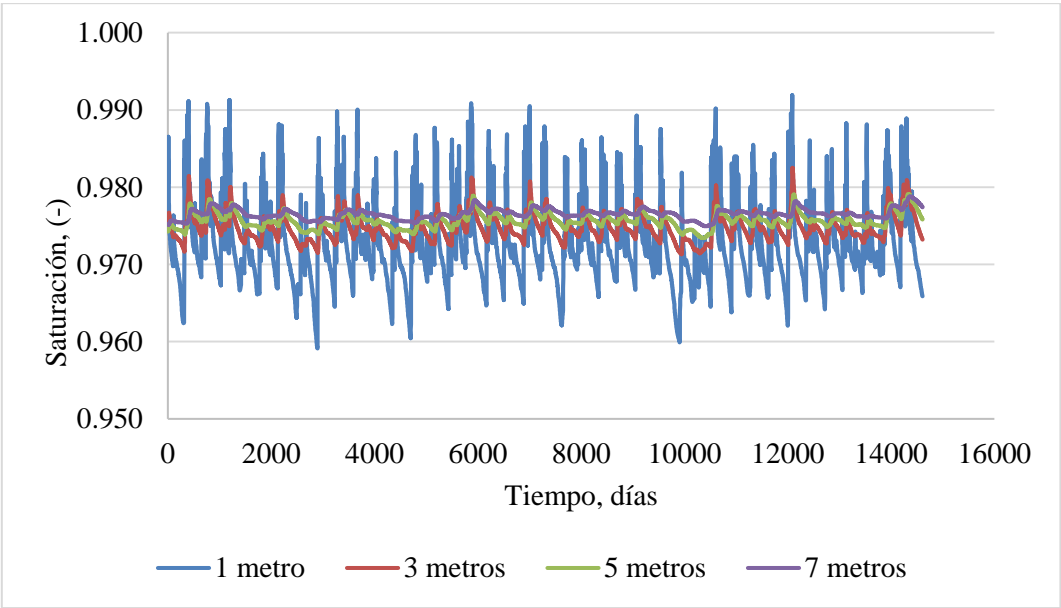
**Anexo 2. Evolución de presiones líquidas para diferentes modelos**

**Arcilla**

Modelo	Calibración	Condición	NF
50 metros	1 año	Impermeable	No saturado



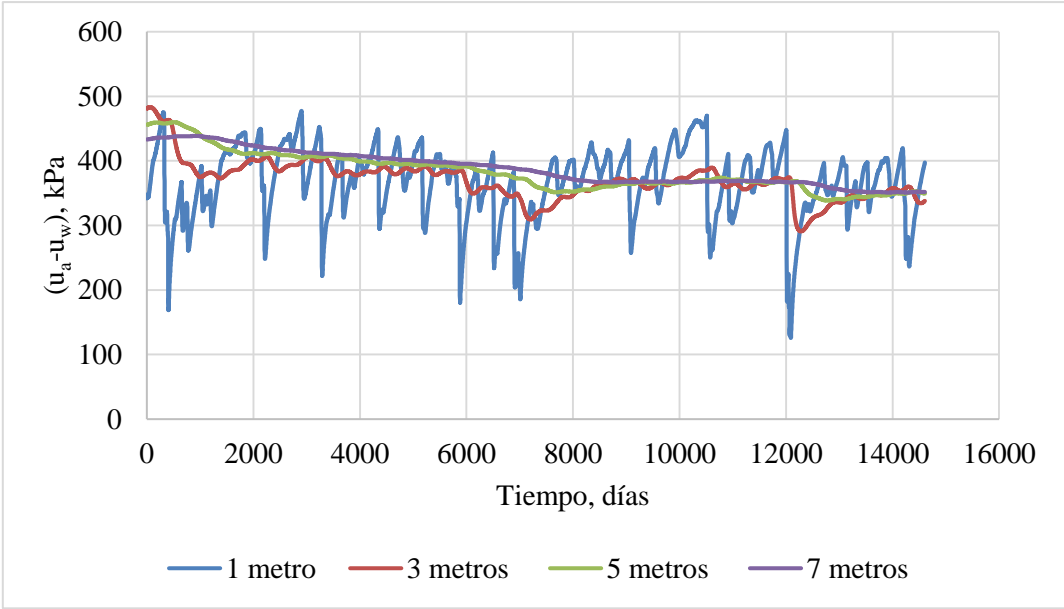
**Figura A 59.** Succión a diferentes profundidades para la condición impermeable de la columna de arcilla (1961-2000)



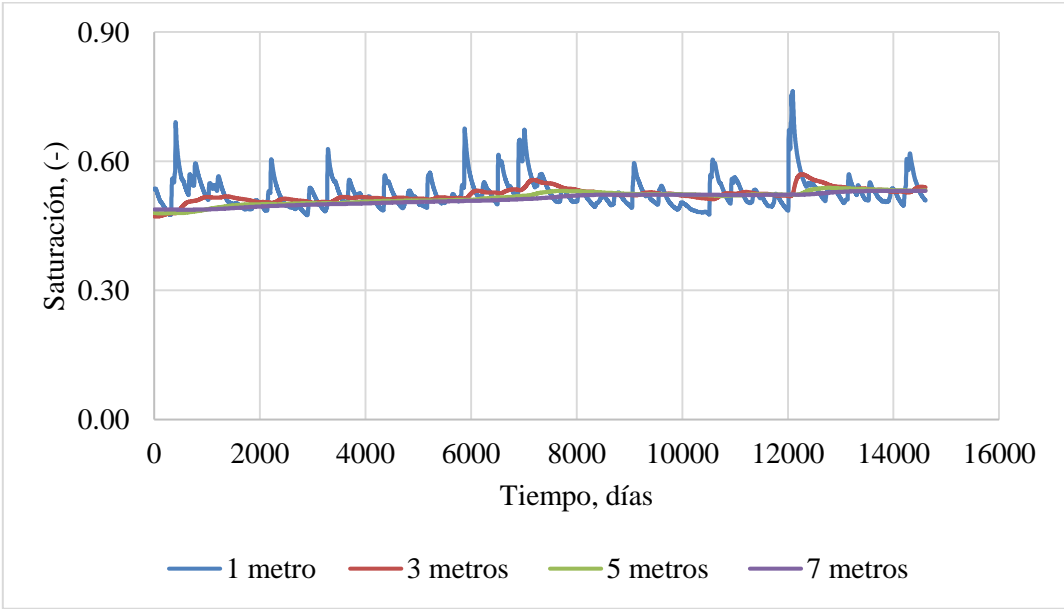
**Figura A 60.** Grado de saturación para la condición impermeable

**Limo**

Modelo	Calibración	Condición	NF
50 metros	1 año	Impermeable	No saturado



**Figura A 61.** Succión a diferentes profundidades para la condición impermeable de la columna de limo (1961-2000)

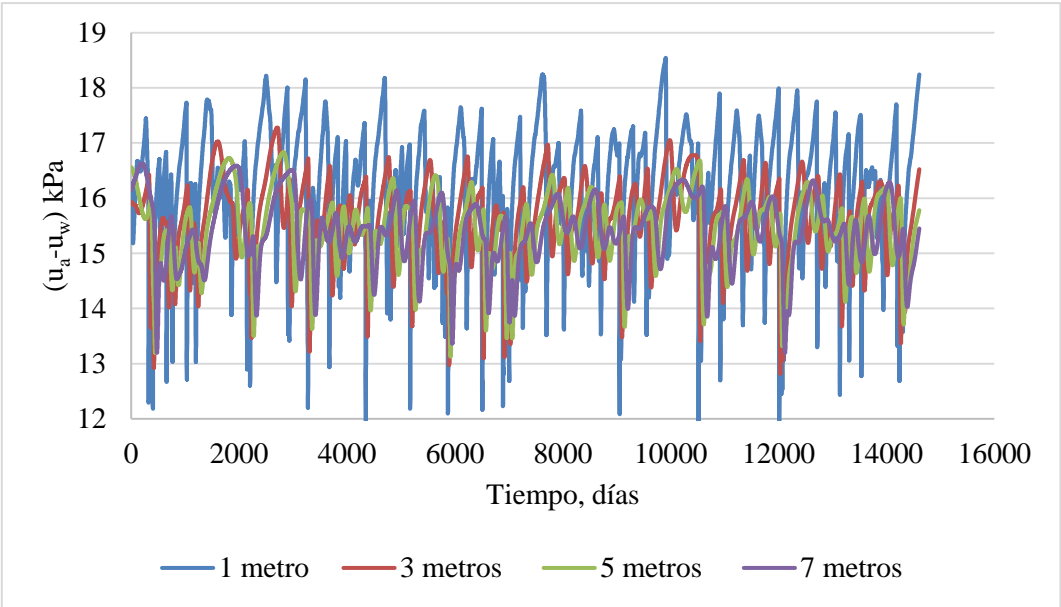


**Figura A 62.** Grado de saturación para la condición impermeable

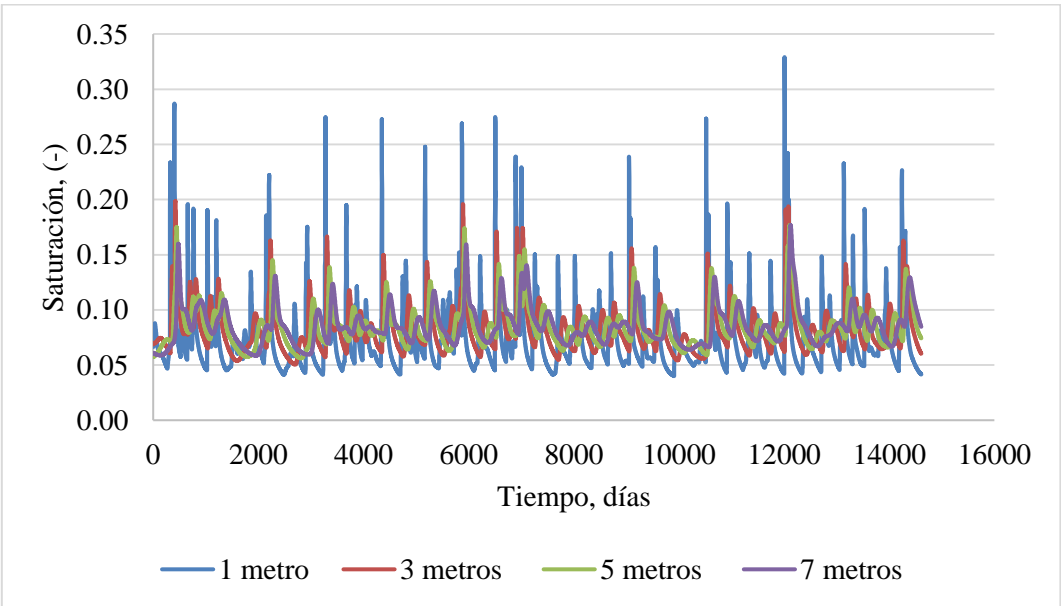


**Arena**

Modelo	Calibración	Condición	NF
100 metros	5 años	Impermeable	No saturado



**Figura A 63.** Succión a diferentes profundidades para la condición impermeable de la columna de arena (1961-2000)



**Figura A 64.** Grado de saturación para la condición impermeable